

부유된 광물성 입자의 침강 속도에 관한 실험

Experiment on Settling Velocity of Suspended Mineral Particles

김종우*

Kim, Jong-Woo

Abstract

This study was to investigate the settling velocity which is an important factor for the prediction of cohesive deposition under the various densities of particle and dissolved ion addition (Na^+ , Cl^- , OH^- , H^+) in rivers, ports, reservoirs and lakes. Settling velocity of suspended fine particles in still water was measured with a pressure sensor (maximum 10 mbar). At the initial concentration of 20 g/l of alumina and quartz the average settling velocities were high due to the aggregation behaviour of particles. At this point it was 0.185 mm/s (alumina) and 0.022 mm/s (quartz). Above this initial concentration it was on the decrease owing to the hindered settling. The higher the salinity is, the faster the settling velocity of alumina and quartz is. Furthermore, in an acid condition the average settling velocity of alumina was on the decrease. In an alkaline water, which causes strong flocculation, the average settling velocity of alumina it was observed on the increase. However, in an alkaline medium the low average settling velocity of quartz powder was measured.

keywords : concentration, flocculation, hindered settling, suspended fine particles

요 지

본 연구는 점착성 퇴적물 예측에 가장 중요한 인자인 침강속도를 강·항만·저수지 그리고 호수에 녹아있는 이온 (Na^+ , Cl^- , OH^- , H^+)의 첨가 및 밀도의 변화 아래 실시되었다. 정수 중에 부유된 미립자(alumina와 quartz)의 침강 속도는 압력센서(최대 10 mbar)로 측정되었다. 초기 농도 20 g/l에서 alumina와 quartz의 평균 침강속도는 미립자의 응집현상 때문에 최고 값을 보였으며, 이때 각각 최대 평균 침강속도는 0.185 mm/s(alumina)와 0.022 mm/s(quartz)이다. 그 후 증가된 초기농도일 경우 간섭침강 때문에 침강속도는 감소하였다. 또한 증가된 염분에서 두 미립자의 평균속도는 증가하였다. 더구나 alumina의 평균 침강속도는 산성에서 감소하다가 알칼리성에서는 강한 응집현상 때문에 높게 측정되었다. 그러나 quartz의 평균 침강속도는 알칼리성에서 낮은 값을 보였다.

핵심용어 : 농도, 응집, 간섭침강, 부유된 미립자

1. 서 론

미립자인 점착성 유사(fine-grained cohesive sediment)는 물리-화학적인 인자(이송성분, 이온성분

(Na^+ , Cl^- , OH^- , H^+ 등) 및 온도 등)들의 영향 때문에 침강속도가 변화된다. 유속 및 운송력이 감소하는 곳, 예를 들면 하천구조물, 저수지, 댐 주위 등에 점착성 미립자가 퇴적된다. 특히 하천의 광물성 미립자는

* 경북대학교 공과대학 건설공학부 BK21 연구교수
Dept. of Civil Engrg., Kyungpook National University
(e-mail: jw-kim@knu.ac.kr)

해수와 만남으로 해수에 녹아있는 이온성분 때문에 플록(floc)현상이 일어나며, 항만 내에서 유동력 약화로 쉽게 퇴적된다. 그러므로 퇴적된 유사는 준설문제를 야기시킨다. 또한 몇 주 또는 몇 개월 동안 부유된 미립자의 탁도 뿐만 아니라 하천에 있는 오염원과 물리-화학적인 작용으로 수질 변화와 수중 생태계에 영향을 끼칠 수 있다. 특히 임하댐은 지난 2002년 태풍 '루사'와 2003년 '매미' 이후부터 흙탕물을 품고 있다. 이런 오염된 점착성 미립자의 퇴적 및 준설문제를 해결하기 위해 미립자의 특성에 대한 이해뿐만 아니라 저수지, 호수 및 댐 주위에 퇴적된 광물성 입자의 양을 계산하는데 중요한 인자인 입자의 침강속도에 관한 연구가 매우 필요하다.

일반적으로 점착성 물질인 광물성 미립자의 크기는 0.1 ~ 50 μm 범위 안에 있다. 특히 비 점착성 물질의 침강 속도는 Stokes법칙으로 계산될 수 있지만 점토, 실트와 같은 무기성분으로 이루어진 점착성 퇴적물(cohesive sediment)의 특성은 복잡하며, 특히 입자의 구성 성분과 하천의 물리-화학적 인자들에 크게 영향을 받아 침강 속도를 측정하는데 큰 어려움이 있다. Johne(1966)은 비점착성 입자(플라스틱 입자)로 농도 증가에 따른 침강 속도가 증가하다가 감소하는 입자의 특성을 증명하였다. 수중에 주로 부유된 광물성 대표적인 미립자는 kaolinite, montmorillonite와 illite 등을 말한다. Migniot(1968) 및 Whitehouse et al. (1960) 등 여러 학자들이 Chloride의 농도변화 아래 광물성 미립자의 침강 속도를 측정하였다. 염분비의 증가와 함께 montmorillonite의 미립자는 입자간에 응집(flocculation)현상이 일어나며, 침강 속도는 증가하지만 반대로 kaolinite와 illite는 염분비 증가에도 불구하고 염분비 2% ~ 3% 이후 침강 속도가 증가하지 않음이 관측되었다. Puls et al.(1988)은 독일 Hamburg 항구도시에 연결된 Elbe 강에서 부유 및 플록된 미립자의 침강 속도를 측정하였으며, 이때 Owen settling tube(길이: 1 m, 지름 5 cm)로 부르는 작은 침강 수주를 사용하였다. 응집된 입자의 크기는 0.0007~0.0411 cm이며, 응집 평균 침강속도는 0.108 cm/s로 측정되었다. 그러나 점착성 미립자의 침강 속도에 영향을 주는 중요한 매개 변수들(입자의 밀도, 입자의 구성 요소, 미립자의 이온 구성성분 및 수중에 녹아 있는 이온성분 때문에 발생하는 점착성(cohesion) 그리고 점성(viscosity) 등)의 영향에 관한 연구가 현재로서 미흡한 실정이다. 특히 침강 속도는 일반적으로 피펫(pipette) 및 부유물 속에 설치되는 센서(sensor)로 직접 측정된다. 그러나 두 실험방법들은 간단하지만 현탁액 속에서 미립자의 속도에 매우 큰 영향을 준다. 즉, 피펫으로 직접 극소량의 부유물을

실험기로부터 옮길 경우 피펫의 흡입력에 따라 그 농도가 결정되며, 또한 부유된 미립자간에 충돌(collision)을 일으키게 하여 침강하는 미립자에 영향을 준다. 그러므로 앞서 언급한 Owen settling tube (Puls et al., 1988)에서 피펫처럼 동일한 방법으로 얻는 샘플은 미립자의 침강 속도를 측정하는데 한계가 있다.

본 연구는 현탁액에 영향을 주지 않기 위해 침강수주 밖에서 부유물의 압력차를 이용하여 압력센서(10 mbar)로 점착성 미립자의 속도를 측정하였다. 또한 전기화학적 인자(Na^+ , Cl^- , OH^- , H^+ 등)의 영향 아래 하천에 주로 녹아 있는 점착성 퇴적물(quartz와 alumina)의 침강 속도를 분석하였다.

2. 수중에서 점착성 미립자의 특성

광물성 미립자는 수중에서 그 무게에 비해 표면적이 매우 크기 때문에 전하를 띄게 되며, 또한 물리-화학적 인자들에 의해 점착성 입자간의 응집 현상이 일어난다. 이런 응집 현상은 광물성 미립자의 크기, 형태, 비중을 변화시키며, 입자의 거동에 큰 영향을 준다. 예를 들면, 침전하는 응집 현상이 일어난 입자의 침강 속도는 한 개의 미립자의 침강속도 보다 더 크다. Fig. 1은 하천에 떠내려가는 부유물과 댐 주위에서 광물성 미립자의 응집 현상, 침강 속도 및 농도 변화를 나타내고 있다. Fig. 1b와 같이 수중에서 점착성 입자 사이의 거리가 가까워질 때 입자간의 인력(attractive force)에 의해 응집 현상이 나타난다. 입자의 농도가 어느 정도까지 증가할 때 입자간의 거리가 짧아져 충돌물이 증가하여 응집 현상이 일어나며, 점착성 입자의 특성이 달라진다. 또한 입자의 지름이 커져 입자의 침강 속도가 증가하는 것을 볼 수 있다.

침강 속도의 경험식으로 농도가 10 g/l보다 작을 경우 Eq. (1)같이 나타낼 수 있다(Johne, 1966).

$$w_s = k_1 C^m \quad (1)$$

정수 중에서 농도가 10 g/l보다 클 경우 아래 Eq. (2)같이 나타낸다(Mehta, 1986).

$$w_s = w_{st} (1 - k_2 C)^\beta \quad (2)$$

여기서, m 과 β 는 침강 속도를 측정하기 위한 경험식의 계수이며, k_1 , k_2 는 경험 상수, w_{st} 는 Stokes 법칙에 계산된 침강 속도, C 는 점착성 농도를 뜻한다.

점착성 미립자의 거동은 중력보다 입자간의 전기화

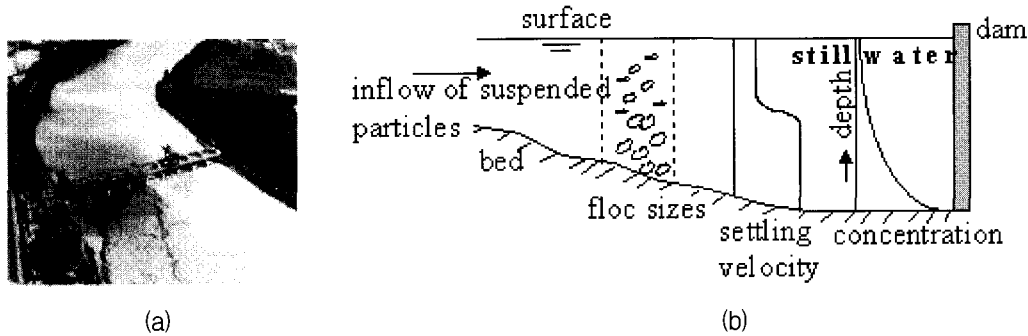


Fig. 1. Resuspension of fine-grained sediments in rivers (a) and velocity and concentration profiles of suspended mineral particles in still water (b)

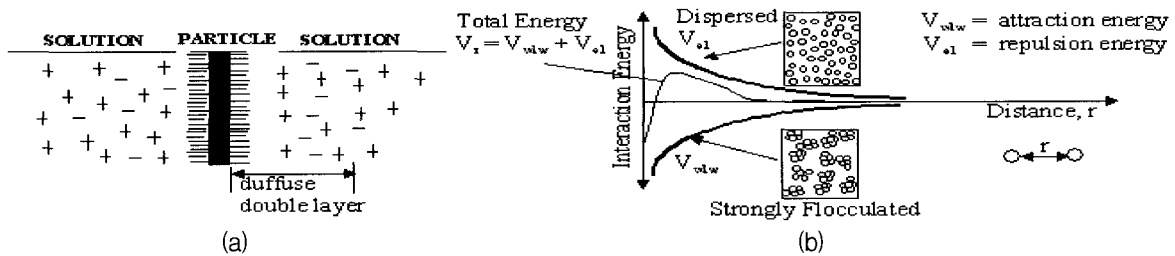


Fig. 2. Idealized model of particle diffuse electric double layer (a) and interaction energies (b) (V_{el} = attraction energy, V_{e1} = repulsion energy)

학적 성질로 변화한다. 즉, 중요한 전기화학적 인자들은 입자의 구성 성분에 따른 인력 V_{vdw} (Van der Waals Forces(intermolecular force)), 반발력 V_{el} (Electrostatic Forces) 등에 의해 특징지어진다. 인력 ($=V_{vdw}$)은 분자 사이의 거리와 입자형상에 의존한다. 이러한 광물성 미립자의 분자 상호간의 힘을 점성이라 말한다. 광물성 미립자의 점성 성분 때문에 입자간의 충돌로 입자간의 거리가 짧아져 입자표면의 전하(電荷)가 연결되어 응집 현상이 일어난다. 입자의 결정체구조의 불완전성 때문에 생기는 전하는 입자를 끌거나 반발하게 한다. 예를 들면, 수중에서 점착성 미립자는 입자 표면에 음이온을 띤다(Van Rijn, 1993). 또한 그 주위에 이온층 즉 반대 이온들이 결합하는 이중층(double layer)이 형성되며, 이 층의 두께가 짧으면 짧을수록 이온들과의 결합이 증가되어 쉽게 응집 현상이 일어난다(Fig. 2a). Fig. 2b는 입자간에 작용하는 힘을 표시하였다. 점착성 미립자간에 응집 현상을 일으키게 하는 충돌(collision)외에 다른 인자는 입자의 점착성, 입자의 밀도, pH, 염분비, 온도 등이 있다.

입자 사이에 인력 V_{vdw} 와 반발력 V_{el} 은 Eq. (3) and Eq. (4)로 나타낸다(Lagaly et al., 1997).

$$V_{vdw}(r) = \frac{-A_H}{12} \left[\frac{d^2}{r^2 - d^2} + \frac{d^2}{r^2} + 2 \ln \left(\frac{r^2 - d^2}{d^2} \right) \right] \quad (3)$$

$$V_{el} = \pi \epsilon_r \epsilon_0 \left[\left(\frac{4k_B T}{ze} \tanh \left(\frac{ze\psi_0}{4k_B T} \right) \right)^2 \right] \exp[-k(r-d)] \quad (4)$$

여기서 A_H 는 Hamaker 상수, d 는 입자의 지름, r 은 입자간의 거리, k_B 는 Boltzmann 상수, T 는 절대온도, k 는 Debye-Huckel의 길이, z 는 이온가, ψ_0 는 표면장력, ϵ_r 는 유전체의 상수를 말한다. 점착성 미립자간에 응집현상을 일으키게 하는 충돌 외에 다른 인자는 입자의 점착성 농도, pH, 염분비, 온도 등이 있다.

3. 실험방법

3.1 미립자의 속도 측정 원리

부유물의 침강속도에 영향을 주지 않기 위해 침강수주 밖에서 현탁액의 압력차를 이용하여 미립자의 침강속도를 측정하였다(Fig. 3a). 사용된 압력센서(pressure sensor)는 독일 HBM(Hottinger Baldwin Messtechnik)사에서 개발하였으며, 최대 10 mbar까지 압력을 측정할 수 있다(Fig. 3b). 압력센서는 높이가 410 mm이며, 지름이 150 mm인 침강 수주에 설치되었으며, 밸브 장치 사이의 거리는 50 mm이다. 점착성 미립자의 침강 속도는 압력 분포차이 변화를 통해 구할 수 있다. 특히 공기 또는 미립자의 입자에 압력센서가 민감하게 반응하므로 이런 측정 오차를 줄이기 위해 침강 수주와 압력센서

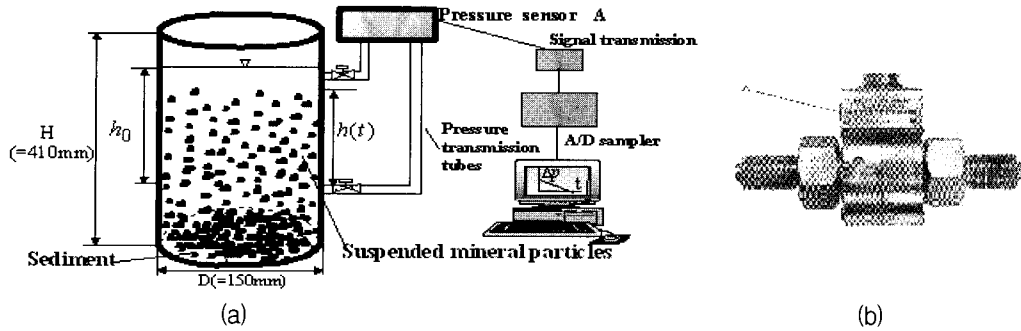


Fig. 3. Experimental set up for research on (a) settling velocities and (b) pressure sensor

사이에 연결된 두 개의 밸브를 측정 전 잠근다. 점착성 입자와 증류수와 잘 섞은 후 동시에 밸브를 열어 압력 변화를 측정한다. Fig. 3과 같이 시간에 따른 점착성 미립자의 침강 압력 변화는 A/D변환기를 거쳐 컴퓨터에 저장된다.

광물성 미립자의 초기 압력은 Eq. (5)같이 표현된다.

$$\Delta p_o = p_o - p_\infty = C_o \Delta \rho g h_o \quad (5)$$

또한 시간에 따른 압력변화는 Eq. (6)과 같이 나타낸다.

$$\Delta p(t) = p(t) - p_\infty = C(t) \Delta \rho g h(t) \quad (6)$$

여기서 p_o 는 초기 광물성 미립자가 침강되지 않을 경우 압력, p_∞ 는 광물성 미립자가 더 이상 침전되지 않는 경

우의 시간일 때 압력, p_t 는 t 시간일 경우의 압력, C_o , $C(t)$ 는 각각 초기농도 및 t 시간일 경우 농도 그리고 h_o , $h(t)$ 는 각각 초기높이 및 t 시간이 경과했을 경우의 부유물의 높이를 말한다.

광물성 입자가 단일 크기로 구성될 경우(Fig. 4a) V_s 는 침강속도를 말하며, 이때 시간에 따른 압력변화는 일정하다. 그러나 두 종류 크기의 미립자가 섞여 있을 경우(Fig. 4b) V_m 는 평균속도를 말하며, 이때 압력변화의 실선은 Fig. 4b와 같이 꺾인점이 나타난다. 그리고 미립자의 크기가 세 가지 이상으로 구성되었을 경우 평균 침강 속도는 Fig. 4c와 같이 계산된다.

광물성 입자의 초기농도 45 g/l를 침강 수주에 부유시킨 후 압력 변화와 미립자의 침강 높이를 비교하였다 (Fig. 5). 이때 증류수의 온도는 22도이며, pH 8.2이다. Fig. 5에서 알 수 있듯이 288초 안에 침강수주에 부유

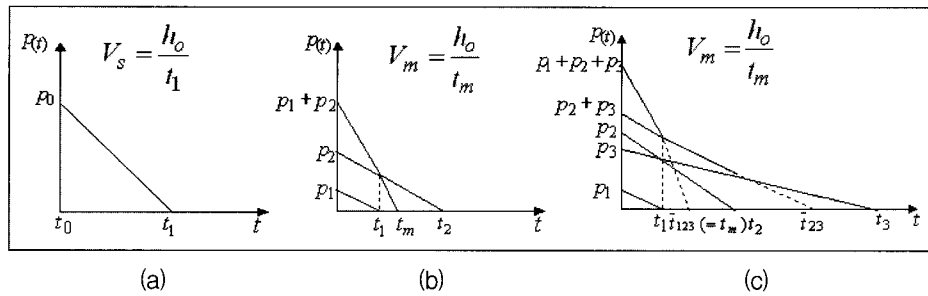


Fig. 4. Distribution of pressure as a function of time and principle for settling velocity: (a) a linear pressure profile, (b) two linear profiles and (c) three linear profiles

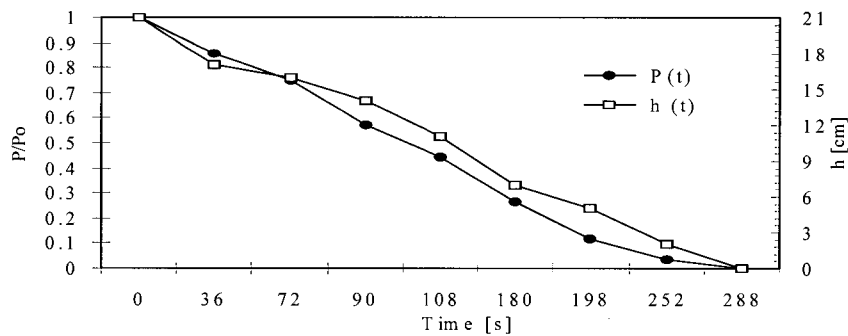


Fig. 5. Comparison between settling height of suspended particles (alumina) and variations of pressure as a function of time

된 미립자가 전부 침전되는 현상을 보였으며, 압력센서로 측정된 시간에 따른 압력분포(=p(t))와 부유된 미립자의 침강높이의 변화(=h(t))는 동일한 결과를 보여주고 있다.

3.2 실험재료

한국 공업 규격 KSF2302에 의한 사립자를 구분하면, 입경 0.005 mm 이하를 점토, 0.005 ~ 0.075 mm를 실트, 0.075 ~ 2.0 mm를 모래, 2.0 ~ 75 mm를 자갈, 그 이상을 암편으로 구분하고 있다. 점착성이 없는 비점착성 퇴적물(모래, 자갈 등)은 입자의 크기 분포에 의해 특징지어진다. 하천에서 점착성 미립자는 montmorillonite ($Al_2(OH)_2Si_4O_{10}$), kaolinite ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$), illite ($K_xAl(Si_{8-6}Al_{0-2})O_{20}(OH)_4$) 같이 세 가지 주요군으로 구분한다. 점토광물은 대체적으로 미량으로 나트륨, 마그네슘, 칼슘, 철성분이 포함하며, 대부분은 석영(quartz(SiO_2)) 성분 및 알루미늄(alumina(Al_2O_3)) 성분과 물로 이루어져 있다(Table 1). 특히 점토는 Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ 이온과 같은 양이온을 구속하며, 물에서 콜로이드 입자의 상태로 부유한다. 점토와 물 사이에는 매우 강한 힘이 상호 작용한다.

물은 콜로이드 점토 입자의 표면에 흡수된다. 콜로이드 점토 입자는 높은 표면적을 가지므로, 많은 양의 물이 이와 같은 방식으로 결합될 수 있다. 점토광물의 구조는 정사면체 얇은 막(tetrahedral sheet) 또는 정팔면체 얇은 막(octahedral sheet)으로 이루어져 있다. 석영은 실리콘(si) 원자가 4개의 산소 원자에 둘러싸여 있는 정사면체 얇은 막으로 연결되어 있다. 알루미늄의 구조는 Al^{3+} 이온이 6개의 산소원자에 둘러싸여 만들어진 정팔면체 얇은 막으로 연결되어 있다.

점착성 점토에서는 Si^{4+} 와 Al^{3+} 이온이 크기는 비슷하고 물 속에 있는 다른 양이온들보다도 치환한다. Fig. 6은 점토광물에 주성분으로 구성된 quartz(LS 500, $d_{50} = 3.5\mu m$)와 alumina(CT 3000 SG, $d_{50} = 0.7\mu m$)의 입자 구조를 보여주고 있다. Quartz는 입자와 입자 사이 모서리가 날카롭게 각이져 있는 반면 alumina는 둥근형태로 입자가 연결되어 있는 형태를 보여 주고 있다.

광물성 미립자의 표면은 일반적으로 pH의 영향아래 음전하 또는 양전하를 띤다. 입자 주위에 형성된 전하층이 pH로 인해 전하가 변하며, 특히 산소이온 또는 수소이온으로 인해 입자 표면 전하가 변한다. Fig. 7은 점토성 퇴적물들의 표면 전하 분포를 나타냈다. pH 6에서

Table 1. Distribution of essential chemical ingredient of mineral particles (Scheffer and Schachtschabel, 1984)

Mineral material	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	TiO_2	CaO	MgO	K_2O	Na_2O
Kaolinite	45~47	38~40	0~0.2	0~0.3	0	0	0	0
Montmorillonite	42~55	0~28	0~30	0~0.5	0~3	0~2.5	0~0.5	0~3
Illite	50~56	18~31	2~5	0~0.8	0~2	1~4	4~7	0~1

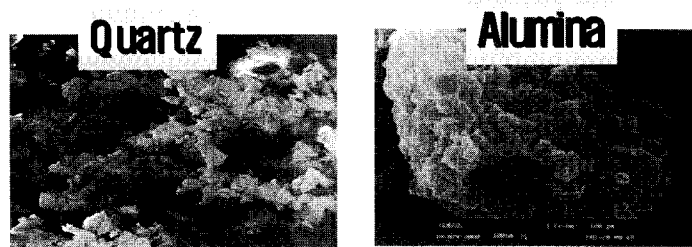


Fig. 6. 2000 times enlarged picture of quartz and alumina by SEM (Scanning Electron Micrograph)

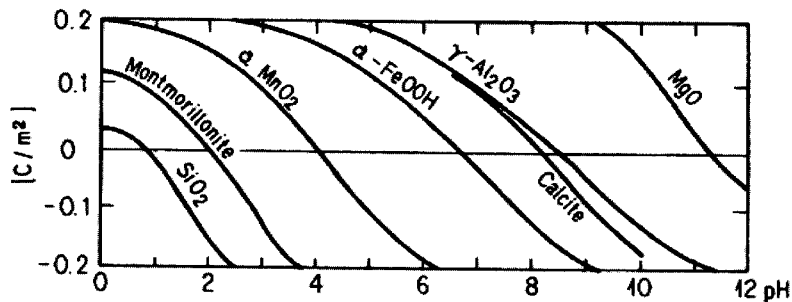


Fig. 7. Electric charged surface of alumina and quartz as a function of pH (Stumm and Morgan, 1981)

pH 8사이에 alumina입자는 양이온을 띄며, 반대로 quartz입자는 음이온을 나타낸다. 주요 점토광물중 하나인 montmorillonite는 pH 7에서 음전하를 형성하고 있다. 이때 alumina의 IEP(Iso Electric Point, $\zeta=0$)은 pH 9에서 일어나며, Quartz는 pH 2에서 측정되었다. Reinshagen et al.(2002)은 alumina의 점성이 산성(pH 3 - pH 5)에서 큰 입자 또는 작은 입자에 관계없이 작다가 점점 알칼리도(> pH 6)로 갈수록 커지며, pH 9에서 가장 크게 일어남을 관측하였다. 여기서 IEP($\zeta=0$)란 입자간의 형성된 이온층이 얇아 입자의 거리가 가까워져서 서로 쉽게 연결되어 응집 현상이 일어나는 지점을 말한다.

4. 미립자 침강속도에 대한 실험결과

4.1 초기농도의 영향

수중에서 이온침가 없이 초기 농도 증가는 미립자의 응집 현상에 영향을 준다. Fig. 8은 Eq. (3)에 의해 유도된 입자 사이의 거리에 따른 미립자 quartz와 alumina의 입자간의 인력을 보여 주고 있다. 입자의 크기가 $0.24 \mu\text{m}$ 일 경우 Van der Waals 힘은 입자간의 거리가 짧을수록 커지며, 이로 인해 입자간의 접촉면의 증가로 응집 현상이 일어난다. quartz의 입자간의 거리 r 가 증가함에 따라 Van der Waals 힘의 값은 $1 \sim 2 k_B T$ 이며, 반면 alumina의 Van der Waals 힘은 $3 \sim 5 k_B T$ 범위 안에서 약한 응집 현상이 일어난다.

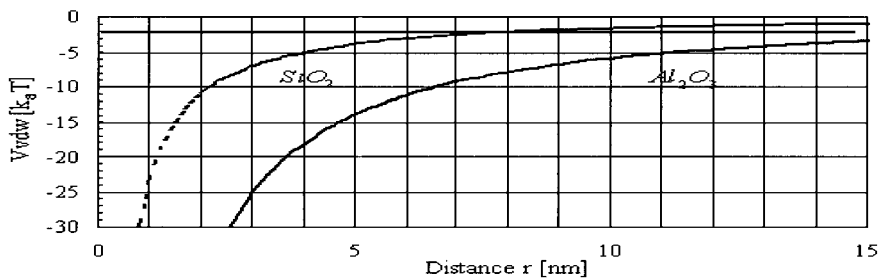


Fig. 8. Calculated van der Waals interaction energies for alumina (Al_2O_3) and quartz (SiO_2) spheres of radius $0.24 \mu\text{m}$

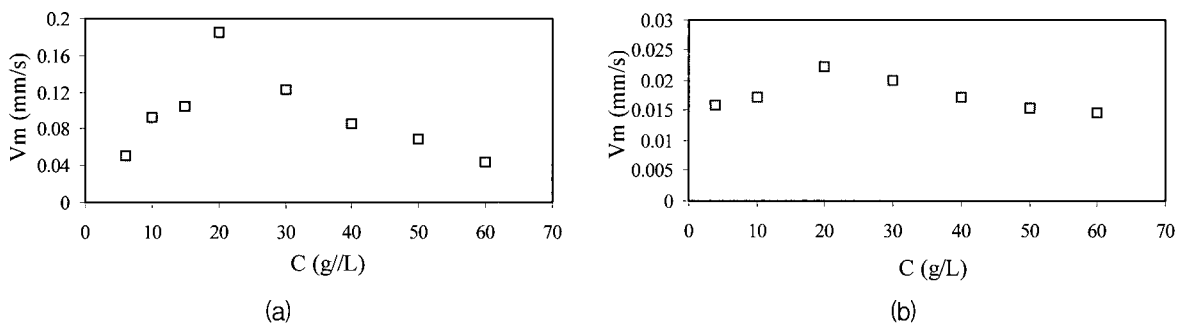


Fig. 9. Mean settling velocity of (a) alumina and (b) quartz versus suspended concentration

Fig. 9a와 b는 alumina와 quartz의 초기 농도 증가에 따른 침강 속도를 보여 준다. 초기 농도는 8 g/l , 10 g/l , 15 g/l , 20 g/l , 30 g/l , 40 g/l , 50 g/l 그리고 60 g/l 범위 안에 있으며, 증류수에서 실험하였다. Quartz와 alumina의 최대 침강 속도는 20 g/l 임을 알 수 있다. 즉, 증류수에서 측정된 평균 침강 속도는 초기 농도 20 g/l 까지 증가하지만 20 g/l 이후 점점 미립자의 침강 속도가 감소함을 나타내었다.

Alumina인 경우 초기 농도 20 g/l 에서 최대 침강 속도가 0.185 mm/s 였으며, 증가된 초기 농도가 60 g/l 일 때 0.044 mm/s 로 감소하였다. Quartz인 경우 초기농도 20 g/l 에서 최대 침강 속도는 0.022 mm/s 였지만, 증가된 초기 농도가 60 g/l 일 때 0.014 mm/s 로 측정되었다.

Fig. 10은 간섭침강이 초기농도 20 g/l 이상에서 발생함을 증명하고 있다. Quartz 미립자의 다른 초기농도 1 g/l (증류수 온도 19.2°C), 초기농도 5 g/l (증류수 온도 18°C), 초기농도 7 g/l (증류수 온도 20°C) 및 초기농도 20 g/l (증류수 온도 19°C)일 경우 시간-농도변화는 초기농도가 증가할수록 빠르게 감소하는 것을 나타낸다. 즉, 초기농도 $1 \sim 20 \text{ g/l}$ 범위에서 초기농도 증가로 침강속도가 증가하며, 초기농도 20 g/l 에서 가장 침강속도가 커지는 것을 알 수 있다. 그럼에도 불구하고 간섭침강에 관한 실험은 많은 한계를 갖고 있다. 왜냐하면 pH 6.5에서 실시하는 실험은 점착성 미립자가 장

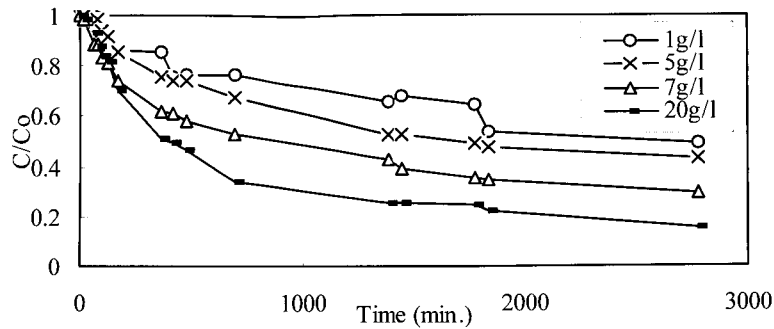


Fig. 10. Typical concentration-time curves with increasing initial concentration

시간 부유하여 침강하므로 침강속도를 측정하는데 많은 시간이 요구되기 때문이다.

Fig. 11에서 초기 농도 증가에 따른 점착성 미립자의 침강속도 증가 및 감소하는 원인에 대해 설명되었다. Fig. 11은 비점착성 입자의 밀도에 따른 침강형태를 나타내었다. w_{st} (= v)는 하나의 미립자가 침강하는 속도를 말하며, w_{ss} 는 그룹을 이루어 침강하는 입자의 침강속도를 뜻한다. d 는 입자의 지름이며, u 는 환원류에 의해 발생한 저항속도이다. Fig. 11a에서 알 수 있듯이 한 개의 입자가 침강할 경우 Stokes 법칙으로 침강속도 (w_{st})는 계산된다.

Fig. 11b는 근접한 거리에서 두 개의 입자가 침강할 경우 속도(w_{ss}) 분포를 나타냈으며, 입자 사이에서 흐름저항이 감소하므로 한 개의 입자의 침강 속도보다 빠르다. Fig. 11c는 세 개 이상의 입자가 그룹을 지어 침강할 때 침강 속도가 증가한다. 그 이유는 유체의 저항력이 입자간의 사이에 중첩이 되어 작아지기 때문이다. 그러나 Fig. 11d와 같이 입자의 증가로 입자 사이의 간격이 좁아질 경우 입자간의 상호 충돌로 밑에서 위로 올라가는 환원류(return flow)가 발생한다면 침강 속도

가 작아지는 현상이 일어난다. 이른바 간섭침강(hindered settling) 현상이라 부른다.

Fig. 12는 물리-화학적인 인자들 때문에 간섭침강하는 초기농도가 변화한다는 사실을 나타낸다. 점착성 미립자는 영국 세번 강어귀(Severn Estuary)에서 채취한 미립자와 alumina이다. 세번강에서 채취한 입자의 평균 속도는 실측하였으며(Mehta, 1986), 입자 분포로 평균 침강 속도를 Eq. (1) and Eq. (2)로 유도하였다. 평균 속도(= w_{st})는 2.6 mm/s와 경험식의 계수 m 과 β 는 각각 1.29 및 4.65이며, 경험 상수 k_1 , k_2 는 각각 0.513과 0.008을 사용하여 Fig. 12에 속도 분포를 나타내었다. 일반적인 연구에 의하면 간섭침강이 일어나는 초기 농도는 10 g/l이지만(Johne, 1966), alumina일 경우 초기 농도 20 g/l에서 발생하는 차이점을 보였다. 또한 세번강의 점토질 입자는 초기농도 3 ~ 5 g/l 사이에서 침강 속도가 증가하며, 초기농도 5 g/l에서부터 간섭침강 현상이 나타낸다(Mehta, 1986). 그러므로 Fig. 12의 간섭침강 농도 상이점은 각각 미립자의 성분, 미립자의 밀도, 탁수의 온도, 다른 이온이 다량 함유한 하천수 (Na^+ , Cl^- , OH^- , H^+ 등을 내포)와 증류수(순수한 물

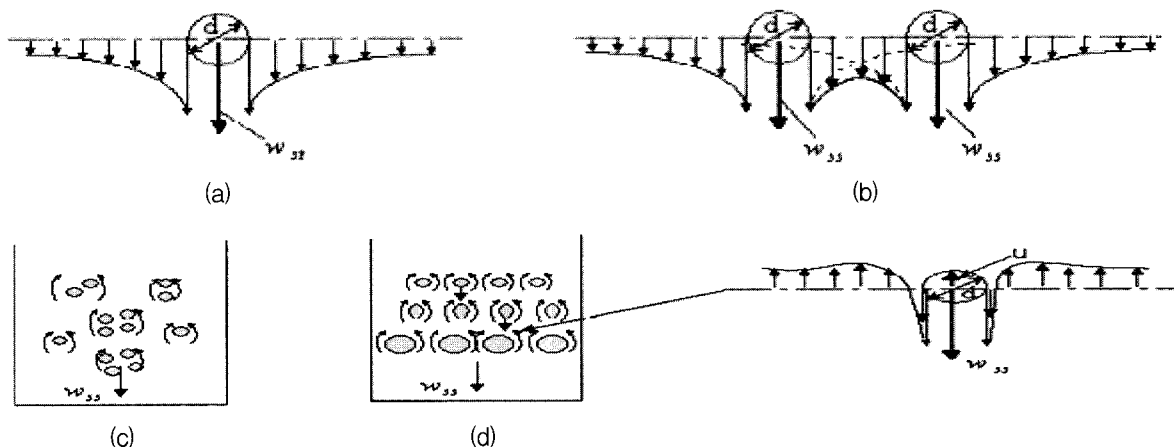


Fig. 11. Settling velocity of particles: (a) in one particle, (b) in two particles, (c) above three particles, (d) in closed particles (w_{st} = settling velocity by Stokes' law, w_{ss} = hindered settling velocity)

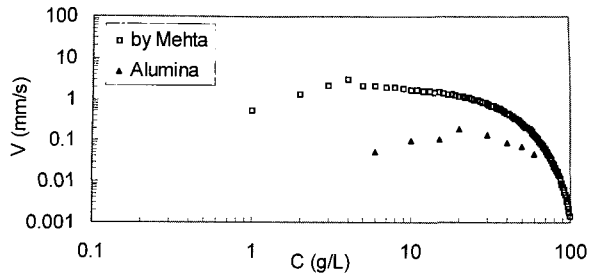


Fig. 12. Comparison between hindered settling velocity of Severn Estuary Mud (Mehta, 1986) from equations in equation (1) and (2) and hindered settling velocity of alumina

성분만 내포) 때문임을 알 수 있다. 즉, 물리-화학적 인자에 크게 영향을 받는 하천수에서 초기농도 60 g/l 까지 미립자의 평균속도가 증류수보다 크게 나타난다.

4.2 NaCl 첨가로 인한 이온의 영향

항만뿐만 아니라 도시수계는 수 많은 인간 활동에 의해 염도가 증가될 수 있다. 그러므로 이온성분을 띄고 있는 점착성 미립자는 쉽게 Na^+ 및 Cl^- 와 이온 교환으로 그 침강 특성이 변화한다. 미립자의 침강 현상에 이온 성분의 영향을 실험하였다. Na^+ 와 Cl^- 첨가로 미립자의 응집 현상으로 인한 농도 및 침강 속도 변화를 관측하였다.

Fig. 13은 측정시간 60분, 120분, 180분 및 300분에서

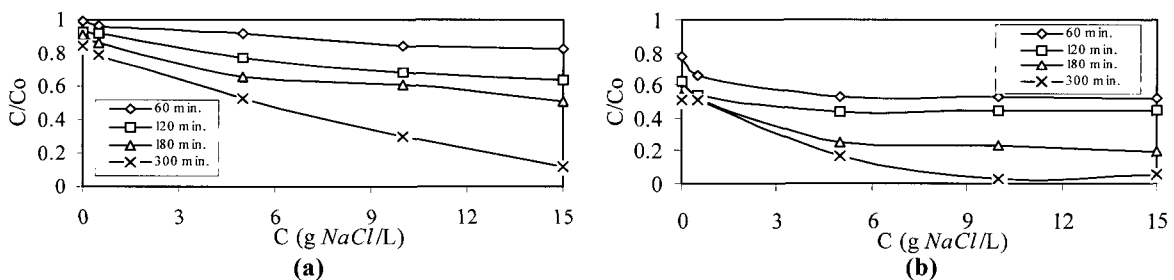


Fig. 13. Typical concentration curves of quartz powder (a) and alumina (b) with the increasing NaCl concentration from settling column

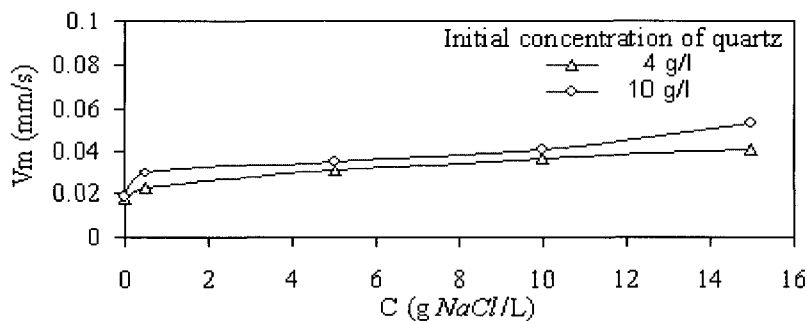


Fig. 14. Mean settling velocity of fine-grained sediment (quartz) as a function concentration (NaCl)

quartz와 alumina의 농도 변화를 나타내었다. 미립자의 초기 농도는 1,000 mg/l이며, NaCl의 농도는 0.5 g/l, 5 g/l, 10 g/l 및 15 g/l 순으로 변화시켰다. 실험 시간 60분 후 염분 15 g/l를 첨가시켰을 경우 quartz의 농도는 약 18 %정도 침전되었으나 alumina는 약 49 %의 미립자가 침전됨을 보였다. 그러나 quartz의 경우 이온 첨가가 없는 증류수에서 약 95 %이상 침전하지 않고 부유한 상태에 있다. 침강시간 300분 후 quartz 미립자의 농도는 염분 0.5 g/l를 첨가했을 경우 약 20 % 이상 침전된 농도가 측정되었으며, 반면 15 g/l의 염분을 첨가할 경우 약 89 % 이상 침강되었다. 미립자 alumina에서는 염분 0.5 g/l 첨가할 경우 50 %, 15 g/l 첨가할 경우는 약 94 % 정도 침전됨을 나타내었다. 또한 alumina가 quartz보다 더 염분에 민감하게 영향을 받으며, 응집 현상이 쉽게 일어난다. 이런 응집현상은 미립자의 하중에 크게 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

Fig. 14는 염분의 영향으로 인한 미립자의 침강 속도 변화를 나타내었다. quartz의 초기 농도는 각각 4 g/l과 10 g/l이며, NaCl의 농도는 0.5 g/l에서 15 g/l까지 변화한다. 염분농도가 크면 클수록 침강 속도가 증가하며, 최대 침강 속도가 0.053 mm/s(초기농도 10 g/l, NaCl의 농도 15 g/l) 및 0.041 mm/s(초기농도 4 g/l, NaCl의 농도 15 g/l)로 측정되었다. Quartz의 침강 속도 변화는 점착성 미립자 montmorillonite와 비슷한 형태로 증가한다.

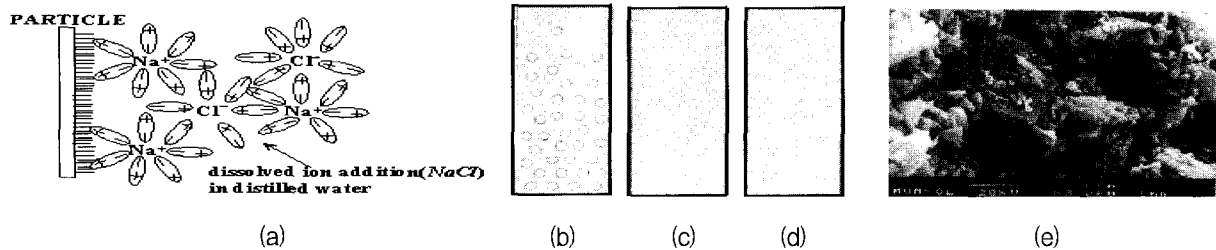


Fig. 15. Flocculation of fine particles under dissolved ion addition (*NaCl*) (a), depositional behavior of alumina (a), (b), (c) in salty water and SEM (Scanning Electron Microscope) of quartz (d)

Fig 15a는 일반적으로 하천에서 음이온을 띠는 광물성 미립자와 첨가한 Na^+ 및 Cl^- 의 이온 증가로 응집 현상을 나타낸다. 우측에 있는 Fig. 15b는 점착성 미립자에 적은 양의 염분과 Fig. 15c는 중간단계 및 Fig. 15d는 많은 양의 염분을 섞은 후 침강 실험을 한 결과를 보여주고 있다. 매우 미소한 양의 염분일 경우 부유된 입자가 천천히 플록(floc)없이 가라앉는 현상을 볼 수 있다(Fig. 15b). Fig. 15c와 같이 적당한 양의 염분이 존재할 경우 서로 응집 현상이 일어나 입자의 크기가 증가되어 빨리 침강하는 것을 알 수 있다. 염분량이 매우 많을 경우 미립자 전체가 연결이 되어 침강 현상이 일어나지 않는 것을 나타낸다(Fig. 15d). Fig. 15e는 *NaCl*의 농도 15 g/l일 경우 SEM(Scanning Electron Microscope)에 의해 확대된 quartz의 입자구조를 나타냈다. Fig. 15d에서 알 수 있는 것처럼 염분이 없을 경우 평균입자(d_{50})의 크기가 3.5 μm 에서 응집발생 후 입자가 10 μm 까지 커진 입자들을 볼 수 있다.

Fig. 16은 염분의 변화에 따른 인력과 반발력(electrostatic Forces)의 분포를 Eq. (3) and (4)에 의해 계산되었다. 계산에 사용된 매개 변수 값은 Table 2에 기술하였다. Fig. 16에서 알 수 있듯이 적은양의 염분농도(c_{eo})가 $3.70 \cdot 10^{-3} mol/l$ 일 경우 입자간의 미는 힘(electrostatic forces)이 강하게 작용하지만 염분의 농도가 증가할수록 인력이 커지는 것을 볼 수 있다. 그러므로 증가된 염분 농도(c_{eo}) 0.26 mol/l에서 인력만 작용하며 응집 현상이 강하게 일어남을 알 수

있다(Fig. 16).

Debye-Huckel의 길이 k 는 Eq. (7)과 같이 나타낸다 (Lagaly et al., 1997).

$$k = 32.87 \cdot 10^8 v \sqrt{c_{oe}} [m^{-1}] \quad (7)$$

여기서, c_{eo} 는 염분농도[mol/l] 이다.

4.3 이온(*NaOH*, *HCl*)의 영향

하천에 흐르는 물은 이온 성분이 있는 퇴적된 광물성 미립자 사이를 흐르면서 부가적인 화학 반응으로 인해 pH가 증가하거나 감소할 수 있다. Fig. 17과 같이 이온성분(*NaOH*, *HCl*)이 하천에 주로 침전된 점착성 미립자(alumina와 quartz)의 침강 속도에 큰 영향을 미치는 사실을 볼 수 있다. 본 실험으로 미립자의 구성 성분에 따라 침강 속도가 변화하는 것을 관측할 수 있었다. 초기 농도 8 g/l인 경우 quartz의 침강 속도는 증류수가 산성일수록 증가했으며, 반대로 알칼리성일수록 감소하였다. 또한 pH 7 이후는 침강 속도의 감소폭이 크지 않는 것을 측정하였다. pH 3.8에서는 quartz powder의 침강 속도가 0.37 mm/s로 증가함을 보였다. 그러므로 quartz powder의 침강 속도는 산성에서 강한 응집 현상이 일어나는 것을 알 수 있다. 그러나 alumina의 침강 속도는 그 정반대의 현상을 보였다. 산성일수록 alumina의 침강 속도는 감소하였으며, 알칼리성일수록 증가하였다. pH 8.9에서 0.75 mm/s의 평균 침강 속도를 보였다.

Table 2. Potential parameters for the coagulating suspension

Parameter	Symbol	Value	Units(SI)
Hamaker constant in water	A_H	$1.02 \times 10^{-20} (SiO_2)$	J
Particle diameter	d	5×10^{-7}	m
Relative dielectric constant of water	ϵ_r	81	-
Absolute temperature	T	293	K
Valency of ions	z	1	-
Surface potential	ψ_o	0.035	V

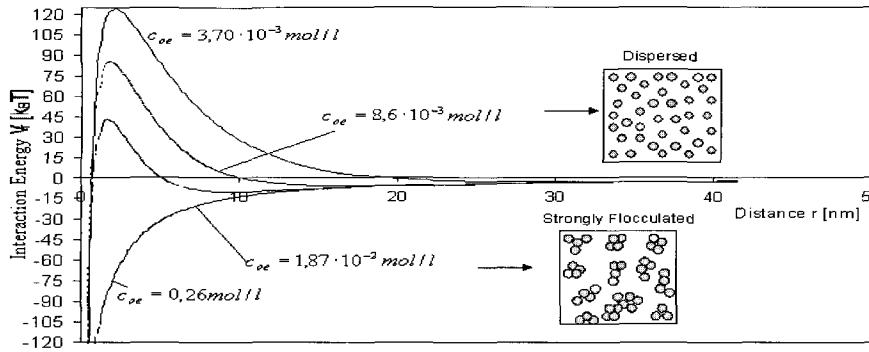


Fig. 16. Schematic energy versus distance curves for double-layer repulsion and van der Waals attraction

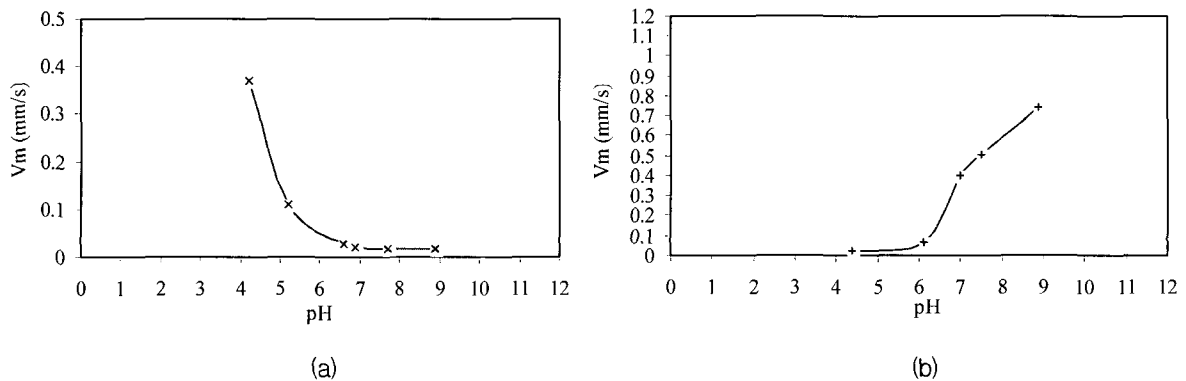


Fig. 17. Mean settling velocity of (a) quartz powder and (b) alumina under ion addition (NaOH, HCl)

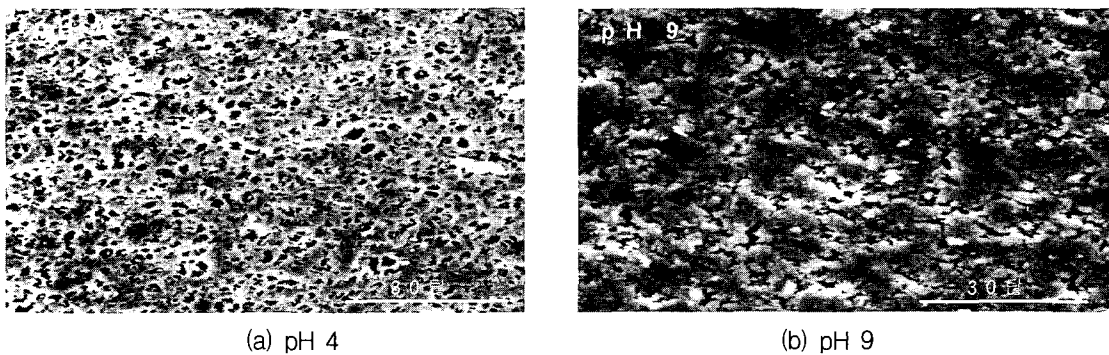


Fig. 18. SEM (Scanning Electron Microscope) picture for aluminium oxid at pH 4 and pH 9

Fig. 18은 SEM(Scanning Electron Microscope)에 의해 pH 4 및 pH 9에서 입자의 형태를 나타낸다. pH 4 일 경우 인력은 낮고 반발력은 커 입자와 입자간의 충돌 현상이 일어나 입자가 응집 현상이 일어나지 않는 사실을 볼 수 있다. 그 이유는 산성에서 HCl 이온의 증가로 H_3O^+ 에 의해 alumina 입자의 표면이 양이온으로 변화되어 강하게 반발력이 작용되기 때문이다(Fig. 18a). 반대로 pH 9에서는 alumina의 입자가 서로 연결되어 있는 형태를 볼 수 있다(Fig. 18b). 앞서 Fig. 7에서 설명하였듯이 그 이유는 pH 9에서 alumina는 IEP(Iso Electric Point, $\zeta=0$)가 발생하기 때문이다. 즉, 이때 입자의 전하층이 얇아져 입자 사이의 거리가 가까

워지며, 쉽게 응집 현상이 일어난다.

Table 3은 국립환경과학원 물정보시스템의 웹상에 제공된 각 수계별 측정된 pH 값이다. 각 수계별 하천수의 pH는 각각 하천 및 댐에서 2006년 8월에 측정되었으며, 수계별 저수지의 pH는 2005년 4월에 측정된 자료이다. Table 3과 같이 하천, 저수지 및 댐의 pH는 중성에서 알칼리성을 나타내며, 특히 금강수계인 금강하구 언에서는 pH가 9.4로 측정되었다. 앞서 언급한 것처럼 지난 2002년 태풍 '루사'와 2003년 태풍 '매미' 때문에 92년 완공된 다목적 댐인 임하댐물이 흙탕물로 변환되어 3년 이상 부유된 미립자가 침전되지 않았다. 2002년 9월 태풍 '루사' 때 임하댐으로부터 상류 200m 지점에

Table 3. pH values measured in the Han, the Geum, the Nakdong and the Yeongsang Rivers

the Han River		the Geum River		the Nakdong River		the Yeongsang River	
Measured location	pH	Measured location	pH	Measured location	pH	Measured location	pH
Gungwang reservoir	7.4	Gagok reservoir	7.6	Kumho reservoir	8.1	Gamdong reservoir	9.8
Tokkye reservoir	7.3	Gyeryong reservoir	8.4	Nambook reservoir	8.2	Dochon reservoir	7.3
Dalong reservoir	7.8	Gongri reservoir	8.3	Daega reservoir	8.1	Nodong reservoir	7.4
Doochang reservoir	7.9	Duckyong reservoir	7.9	Hoenggye reservoir	7.0	Dalong reservoir	7.6
Gognungcheon 2	7.6	Daejeoncheon 1	9.1	Hapocheon 2	7.2	Dongbokchun	8.1
Dorimcheon	8.6	Dodangcheon	7.5	Gacheon	7.2	Bosungcheon	7.2
Tancheon 1	7.6	Dugyecheon	7.7	Goheuncheon	7.0	Soeuhcheon	6.8
Cheonggyecheon 1	7.9	Gapcheon 1	8.6	Gilancheon	8.5	Gwangyang seochon	7.5
Paldang dam 4	6.8	Daechong dam 3	8.9	Gachang dam 2	7.6	Damyang dam 1	8.0
Chungpyung dam 1	7.8	Boryeong dam 2	8.0	Choocheon dam	7.1	Dongbuk dam 2	7.0
Chungju dam	8.9	Buan dam 2	7.6	Hapchon dam	8.2	Bosunggang dam 2	8.5
Goesan dam	8.1	Estuary of Geum river	9.4	Imha dam 1	7.1	Sumjingang dam 1	7.4

서 실측한 년 평균 pH는 8.25이었으며, 같은 지점에서 2003년 실측한 년 평균 pH는 7.95였다. Table 3과 같이 2006년 8월 측정된 년 평균 pH가 7.1인 임하댐 사례에 Fig. 17의 연구결과를 임하댐에 적용할 경우, 부유된 점착성 미립자는 석영(quartz)성분을 다량 내포한 광물성 미립자로 사료된다. 이는 Fig. 17에서와 같이 석영이 pH 6.5 이상에서 침전속도가 매우 작아 장시간 탁도 현상을 보이기 때문이다. 이때 하천 점착성 미립자의 주 성분인 alumina는 pH 6.5이상 될 경우 침전속도가 증가하며(Fig. 17), pH 9에서 가장 빠른 침전속도를 나타낸다. 또한 국내 각 수계별 댐, 하천 및 저수지에서 조사된 pH가 6.8이상이었으므로 위와 같은 점착성 미립자가 유입될 경우 quartz 입자 성분 때문에 ‘흙탕물’ 같은 장시간 탁도 현상이 일어날 수 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 압력센서(최대 10 mbar)로 부유된 미립자의 압력차를 이용하여 광물성 미립자의 침강 속도를 실험하였다. 밀도의 증가뿐 아니라 이온성분(Na^+ , Cl^- , OH^- , H^+ 등)의 첨가로 침강거동을 관측하였으며, 그 연구 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 1) 미립자(alumina)의 초기 농도 8 g/l 보다 증가된 초기 농도 20 g/l일 때 침강 속도가 3.7배 빨리 침강하였다. 이를 통해 부유된 미립자의 농도의 증가는 입자간의 거리가 짧아져 미립자간의 접촉면의 증가로 입자의 응집 현상이 일어나 침강 속도가

가 증가됨을 알 수 있었다. 또한 미립자(quartz powder, alumina)의 초기농도 C_0 가 60 g/l까지 증가할 때 평균 침강속도는 초기 농도 20 g/l까지 증가하다가 그 이후 감소한다는 사실을 관측할 수 있었다. 일반적인 연구에 의하면 점착성 미립자가 감소하기 시작하는 평균 속도의 초기 농도는 10 g/l이지만, 본 연구의 실험 재료인 quartz powder 와 alumina는 초기 농도 20 g/l에서부터 간섭 침강(hindered settling) 현상 일어나 침강 속도가 감소함을 알 수 있다. Alumina의 최대 침강속도는 0.185 mm/s였으며, quartz는 0.022 mm/s였다.

- 2) 점착성 미립자(quartz powder, alumina)는 쉽게 Na^+ 와 Cl^- 와 이온교환 및 플록(floc)현상을 일으켜 침전 속도가 빨라진다. 그 이유는 입자의 거리가 짧아질수록 이온 Na^+ , Cl^- 및 증류수(H_2O)와 미립자간에 화학적인 작용으로 인력(Inter-molecular force)이 서로 반발하는 힘(Electrostatic Forces)보다 증가하기 때문이다. 광물성 미립자 kaolinite와 illite(Whitehouse 등, 1960)는 염분비 증가에도 불구하고 염분비 2% - 3% 이후 침강속도가 증가하지 않지만, quartz powder와 alumina의 침강 속도는 Na^+ 와 Cl^- 량 0 g/l ~ 15 g/l 범위 안에서 증가된다. 그리고 염분비의 증가와 함께 속도가 증가하는 montmorillonite의 미립자와 비슷한 현상을 보였다. 또한 alumina가 quartz 보다 Na^+ 와 Cl^- 량에 민감하게 반응하며,

빠른 침강현상을 나타냈다.

3) *NaOH*를 첨가할수록 alumina의 침강 속도는 증가하였으며, pH 8.9에서 0.75 mm/s의 평균 최대 침강 속도를 보였다. 반대로 *HCl*의 증가는 침강 속도를 감소시켰다. 그러나 quartz의 평균 최대 침강 속도는 그 정반대의 현상을 보였으며, pH 3.8에서 0.37 mm/s이다. 그 이유는 pH 3.8에서 quartz는 IEP(Iso Electric Point, $\zeta=0$)가 발생하며, 입자의 전하층이 얇아질 뿐만 아니라 입자 사이의 거리가 가까워져 쉽게 응집 현상이 일어나기 때문이다. 그러므로 본 실험결과를 실제하천에 적용할 경우 즉 각 수계별 하천, 저수지 그리고 댐에서 측정치가 pH 6.8이상이면 점착성 미립자(kaolinite와 illite, montmorillonite)가 유입될 경우 quartz성분 때문에 장시간 탁도 현상이 나타날 수 있을 것으로 사료된다. 왜냐하면 점착성 미립자의 성분은 약 80% 이상이 quartz 및 alumina로 구성되었으며, 침강속도는 pH에 큰 영향을 받기 때문이다. 즉, 하천 또는 댐의 pH가 6.5이상 일 경우, 흘러 들어온 점착성 미립자중 alumina는 침강속도의 증가로 하상에 단시간 침전하여 탁도 현상이 없는 반면, quartz의 침전속도는 매우 작아 장시간 탁도 현상을 보이면서 하상에 퇴적되기 때문이다. 실제 2002년 태풍 ‘루사’ 이후 위 연구결과는 pH가 7이상으로 측정된 임하댐에서 탁도가 장시간 유지된다는 사실로 입증되었다.

감사의 글

이 논문은 2007년도 두뇌한국21(BK21)사업에 의하여 지원되었습니다.

참고 문헌

Johne, R. (1966). *Einfluss der Konzentration einer monodispersen Suspension auf die Sinkgeschwindigkeit ihrer Teilchen*. Fortschr.-Ber. VDI-Z. R 3.11, 1/89 (in German).

Lagaly, G., Schulz, O., and Zimehl, R. (1997).

Dispersionen und Emulsionen. ISBN 3-7985-1087-3, Steinkopff Verlag Darmstadt (in German).

Mehta, A.J. (1986). "Characterization of cohesive sediment properties and transport processes in estuaries." In *Estuarine Cohesive Sediment Dynamics*. A.J. Mehta(ed) Springer Verlag, pp. 290-325.

Migniot, C. (1968). *A study of the physical properties of various forms of very fine sediments and their behaviour under hydrodynamic action*. La Houille Blanche, No. 7, 591-620.

Puls W., Kuhl H., and Heymann K, (1988). "Settling velocity of mud flocs: results of field measurements in the Elbe and the Weser Estuary." In *Physical Processes in Estuaries*. J. Dronkers and W. van Leussen (Eds.) Springer-Verlag, Berlin: 404-426.

Reinshagen, J., Oberacker, R., and Hoffmann, M. J. (2002). *Korrelation zwischen Teilchenwechsellwirkung und Grünkörpereigenschaften nassgeformter Keramiken*. Arbeitsbericht des DFG Projektes (in German).

Scheffer, F., and Schachtschabel, P. (1984). *Lehrbuch der Bodenkunde*. Ferdinand Enke, Stuttgart (in German).

Stumm, W., and Morgan, J. J. (1981). *Aquatic Chemistry*. 2nd edition, John Wiley, Interscience, New York.

Van Rijn, L. C. (1993). *Principles of fluid flow and surface waves in rivers, estuaries seas and oceans*. Delft Hydraulics, The Netherlands.

Whitehouse, U. G., Jeffrey L. M., and Debbrecht J. D. (1960). "Differential settling tendencies of clay minerals in saline waters." In *Clays and Clay Minerals*, 7th, A. Swineford (ED.) Washington DC, 195. Pergamon Press, New York: 1-79.

(논문번호:07-36/접수:2007.04.10/심사완료:2007.08.17)