

기포에 의한 점착성 퇴적물의 부유

Resuspension of Cohesive Sediment under Presence of Gas Bubbles

김종우*
Kim, Jong Woo

Abstract

The elimination and erosion of cohesive sediments in port and reservoir water can so far be processed only with mechanical evacuation methods under extreme energy expenditure. The so-called flushing jets do not serve the purpose because they cannot set the material spaciouly in motion despite high shear stresses at the bed. Therefore this study aims to examine the resuspension of the deposited fine material(Al_2O_3) under presence of gas bubbles in order to decreased cohesive sediments in multipurpose dam, port and lakes. In the case of laboratory trial important parameters considered are supplied amount of air and the consolidation time of the solid materials. With increasing gas content alumina remains in suspension at high pH values in the laboratory test, where the particles fall more rapidly without air addition.

keywords : cohesive sediment, resuspension, erosion, consolidation, bubbles

요 지

항만 및 저수지에서 점착성 퇴적물의 침식 및 제거는 극도로 큰 에너지를 동반한 기계적인 배출방법으로 단지 가능할 수 있다. 소위 분사방법은 높은 전단력에도 불구하고 점착성 퇴적물을 움직이게 하는데 실효를 거두지 못하고 있다. 그러므로 본 연구는 다목적댐, 항만 그리고 호수 등에서 퇴적된 점착성 미립자들을 저감시키기 위해 기포 투입으로 침전된 미립자(Al_2O_3)의 부유현상을 실험하는데 목적을 두고 있다. 실험을 통해 중요한 매개변수는 투입된 기포의 양과 침전된 퇴적물의 응고시간인 것을 알 수 있었다. 기포 투입없이 높은 pH값에서 빨리 침전되는 미립자 퇴적물(alumina)은 기포의 증가로 입자의 부유현상이 일어난다.

핵심용어 : 점착성 퇴적물, 부유사, 침식, 응고, 기포

1. 서 론

미세한 광물성 입자들이 자연하천의 침식으로 이송된다. 점착성 미립자는 흐름이 작은 하안 구조물(Chapra, 1997) 또는 하천과 해수가 만나는 해안(Mehta, 1986), 호수 및 항만에 쌓여 수위변동을 야기시키며, 이온성분 때문에 다른 오염 화학종과 반응하여 하천수질 오염원으로 작용한다. 매년 운하 또는 항만에 쌓인 퇴적물을 제거하는 비용이 미국 샌프란시스코

항만에서는 2백만 달러(Krone, 1962), 프랑스에서는 운하와 항만에 퇴적된 미립자들 준설을 위해서 약 7천만 달러(Teisson, 1991)가 들며, 독일에서는 매년 약 5~8천만 유로가 든다. 하천에서의 광물성 퇴적물들의 크기는 $0.1 \mu m \sim 50 \mu m$ 범위 안에 있으며(Osmann-Sigg, 1982), 이온성분 때문에 입자들의 지름이 물리-화학적 특성에 따라 크게 변화할 수 있다. 미립자들은 입자간의 충돌(collision)과 응집(flocculation)현상에 의해 입자지름이 커졌다가 분열(breakup)로 작아져 이송

* 한국건설기술연구원 수자원연구부, 박사후연구원
Water Resources Research Dept., Korea Institute of Construction Technology
(e-mail: jw-kim@kict.re.kr)

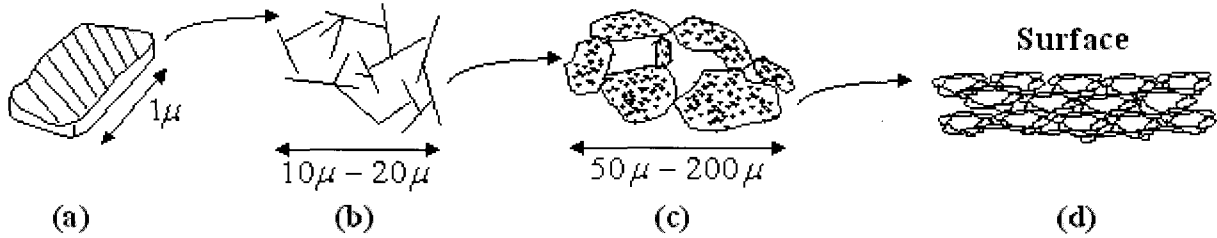


그림 2. 광물성 미립자의 응집 및 응고현상(from Van Leussen, 1994)

점착성 광물성 미립자는 물속에서 플록형성 때문에 1,000 μm 까지 커질 수 있다(Van Leussen, 1994). 또한 응집된 입자와 입자 상호간에 연결된 상태로 침전되어 응집된 점착성 상부의 하층으로 침전하는 동안 상호간의 간극이 작아져 응고현상을 일으킨다. 또한 물리-화학적인 성분으로 인해 입자구조가 밀착된다. 흐름속도가 감소하는 강이나 저수지에 쌓인 점착성 퇴적물은 시간이 가면 그 위에 계속 새로운 퇴적물이 쌓여서 점차 압력을 받는다. 이를 다짐현상이라하며, 이러한 현상이 퇴적물 전체에 광범위하게 일어나면 점착성 퇴적물은 단단해진다(그림 2(d)).

2.2 공기 방울 투입으로 인한 침식현상

물리-화학적인 작용으로 응고된 점착성 미립자를 침식 및 부유시키기 위한 방법으로는 물의 흐름을 통한 전단력 외에 공기압력으로 할 수 있다. 항만이나 저수로, 댐 주위 등 제한된 구역에서 흐름속도를 증가시키기에는 어려움이 있다. 그러나 공기투입으로 난류현상을 일으켜 기포(O_2 , CO_2 , SO_2 , N_2)에 부착시킨 점착성 미립자를 상부로 이동시킬 수 있다. 광물성 미립자의 퇴적에 따라 3가지 퇴적물의 파괴 및 침식현상을 일으킬 수 있다. 그림 3(a)와 3(b)에서 볼 수 있듯이 기포의 투입으로 인한 퇴적층사이에 수압의 증가와 그로 인해 증가된 전단력 때문에 미립자의 연결고리가 끊어져

침식이 일어나며, 퇴적층의 전단력 및 입자의 구성형태에 따라 직선 또는 곡선 홀 형태의 퇴적층 파괴가 생긴다. 즉 미립자의 응집된 형태가 일정하게 수직으로 나열되어 있을 때 기포투입으로 인해 직선형태의 파괴현상이 일어나며, 반대로 입자의 구성형태가 가로로 퇴적되어 연결되어 있을 경우 곡선형태의 파괴된 홀이 형성된다. 그림 3(c)는 퇴적층들이 서로 상호간에 간극물이 작아 단단히 굳어 입자간에 서로 연결되어 있을 때 일정한 공기투입으로 전체 퇴적층이 동시에 침식 및 부유현상이 일어난다. 현탁액속에서 기포와 광물성 미립자는 물리-화학적인 성분 때문에 충돌과 응집현상이 일어난다(Mihopoulos, 1995).

일반적으로 유체의 흐름 속에 기포를 투입한 침강수주 안에서 1차원 침전-분산 모형(one-dimensional sedimentation-dispersion model)은 공기가스가 실험기의 높이에 따라 영향을 받지 않을 경우, 유체양(ϵ_l)이 침강수주에 일정할 경우 및 미립자의 크기가 균일할 때 식(1)과 같이 표현된다(Smith와 Ruether, 1984).

$$-\frac{E_s}{H} \frac{dC}{dz} + \left[\frac{u_i}{1-E_g} - \epsilon_l u_s \right] C = \frac{u_i C_{sf}}{1-E_g} \quad (1)$$

여기서 E_s 는 분산계수(m^2/s), u_i 는 유체속도(m/s), C 는 입자농도(g/l), C_{sf} 는 유체의 흐름으로 인한 솟아

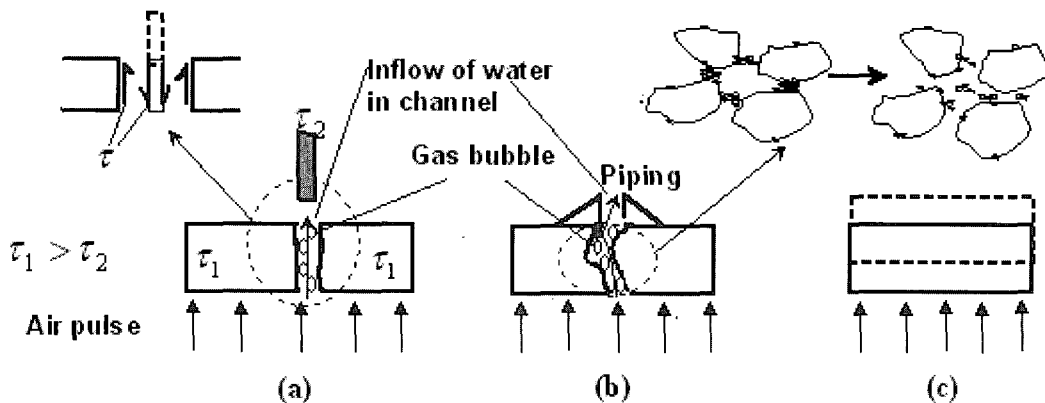


그림 3. 공기압력으로 인한 침전된 퇴적물의 침식현상

오르는 미립자의 농도(g/l), E_g 는 기포가스양, ϵ_l 은 유체양(무차원, $\epsilon_l = (1 - (C_m/\rho_s))$), 평균 미립자의 농도 C_m (g/l), 미립자의 비중 ρ_s (g/cm^3), H 는 침강수주 높이(m)이며, u_s 는 기포 투입할 경우 입자의 침강속도 (m/s) 로써 정의된다.

방정식 (1)은 다른 침강수주로의 유체이동이 없을 때 ($u_i = 0$) 식(2)와 같이 간단히 제시한다.

$$-\frac{E_s}{H_0} \frac{dC}{dz} = \epsilon_l u_s C \quad (2)$$

식(2)은 왼쪽은 확산(diffusion)향과 오른쪽은 이송(advection)향으로 이루어졌으며, 바닥근처의 수심 $z = 0$ 에서의 농도 $C = C_0$ 일 경우 수심에 대해 적분하면 아래 식(3)으로 나타낸다.

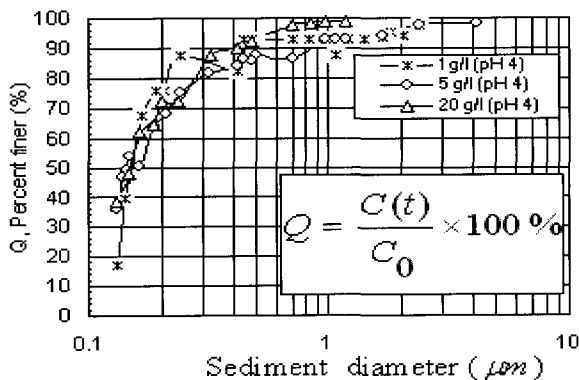
$$C(z) = C_0 \exp \left[\frac{-\epsilon_l u_s H z}{E_s} \right] \quad (3)$$

식(3)으로 정류수면 조건하에서 기포를 투입한 연직 방향의 미립자의 농도변화를 계산할 수 있다.

기포투입된 침강수주에서의 미립자의 침강속도 u_s 는 경험식에 의해 아래 식(4)으로 계산할 수 있다 (Kato 등, 1972).

$$u_s = a V_s^b u_{gl}^c \epsilon_l^d \quad (4)$$

여기서 a, b, c, d 는 독립변수, u_{gl} 는 침강수주 안에서의 기포가스속도이며, V_s 는 Stokes의 식에 의한 입자의 침강속도를 말한다.



(a) pH 4.0

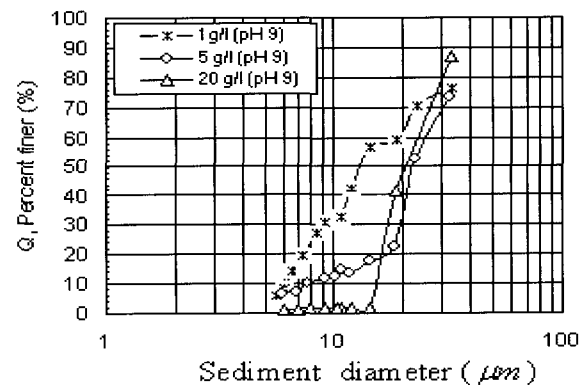
3. 실험 및 결과

3.1 실험 재료 및 방법

실험 재료는 광물성 퇴적물에 가장 많이 차지하는 성분 중에 하나인 알루미늄(Al_2O_3 , $\rho_s = 3.94 g/cm^3$)을 선택하였다. 예를 들면 하상에 퇴적되거나 녹아 있는 미립자 illite와 kaolinite는 각각 석영(SiO_2)의 성분이 질량기준으로 50 ~ 56 %와 45 ~ 47 %, 알루미늄(Al_2O_3)은 18 ~ 31 %와 38 ~ 40 %로 구성된다.

그림 4는 기포를 투입하지 않을 때 점착성 미립자(Al_2O_3)의 무차원 농도 백분율 $Q(\%) = (C(t)/C_0) \times 100$ (시간변화에 따른 미립자의 농도 $C(t)$, 초기농도 C_0)에 대한 미립자의 입경분포를 나타냈다. pH 4.0일 때는 미립자 농도와 상관없이 중앙입경지름(median diameter) $d_{s,50}$ 은 약 $0.15 \mu m$ 이며, pH 9.0일 때는 초기농도변화에 따라 그 크기가 증가하여 변화하며, 대략 13 ~ 25 μm 이다. 그러므로 높은 알칼리도에서 미립자(Al_2O_3)의 침강시간은 초기농도 1,000 mg/l 와 20,000 mg/l 사이에서 10분에서 70분 안에 모든 미립자들이 퇴적된다 (측정 높이 $h = 215 mm$).

실험은 plexiglass로 제작된 높이 1,000 mm, 가로 141 mm, 세로 141 mm인 침강수주에서 실시하였다(그림 5). 부유농도 측정을 위해 CCD-Camera(CCD: Charged Coupled Device)를 이용하였다. 그림 5에서 보듯이 CCD-Camera와 일반 빛을 쏘는 장치가 이동기계에 의해 실험기 밖 하부지점에서 상부지점까지 함께 이동하며 부유농도 측정을 하도록 만들어졌다. 공기는 실험기 하부지점에서 미립자가 침강한 후 투입되며, $5 \mu m$ 필터와 225개의 0.3 mm 지름의 구멍이 뚫린 플라스틱 판넬을 통해 공기방울이 생성된다. 투입된 공기압력 p_a



(b) pH 9.0

그림 4. pH 영향아래 미립자(Al_2O_3)의 입경분포

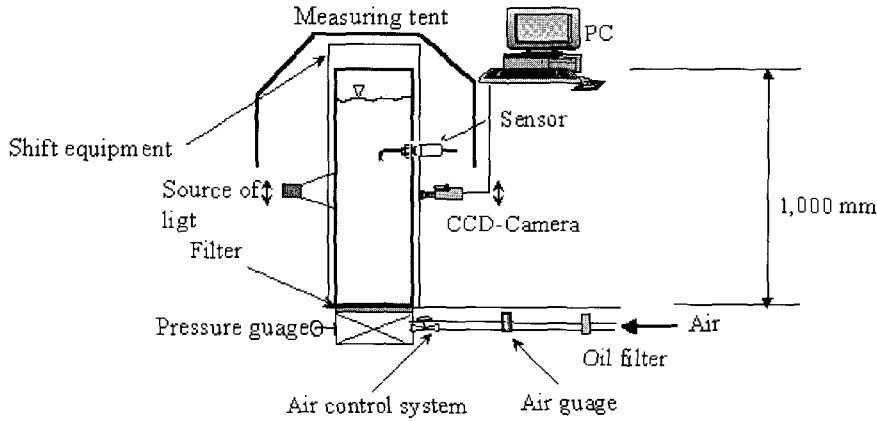


그림 5. 기포투입으로 광물성 퇴적물의 부유실험을 위한 실험장치

가 0.1 ~ 0.45 bar 이며, 오일 필터를 통해 공기 속에 있는 불순물을 제거하였다. 현탁액 속에 있는 공기방울 크기측정을 위해서 강도 1 mW인 레이저 광선을 이용하였다(그림 6). 흡입 센서에 의해 내경(d_k)이 2 mm되는 작은 유리관에 흡입된 기포는 두 개의 서로 다른 다이오드 레이저의 빛을 통과하게 된다. 이때 포토트랜지스터에 전달된 두 개의 다른 빛의 강도는 다른 크기의 신호값으로 나타낸다. 여기서 흡입속도 $W_k = \Delta s / t_4$ (Δs : 다이오드 레이저 사이의 거리, $t_4 (= t_3)$: 기포가 흡입유리관안의 레이저의 빛을 통과하는 시간)와 흡입유리관에서의 기포길이 $l = W_k / t_1$ (t_1 : 흡입관안의 다이오드 레이저 사이에 기포가 지나가는 시간)으로 기포의 체적 V_b 를 계산할 수 있으며, 구형인 기포 체적과 같다고 가정하면, 그림 6에서 알 수 있듯이 신호가 발생하는 시간차이에 의해 기포의 지름 d_b 가 결정된다.

3.2 실험결과

점착성 미립자(Al_2O_3)는 pH 8.1과 초기 농도 10,000 mg/l와 20,000 mg/l 일 때 45분 안에 침강 수중에 완

전히 침전되었다. 기포량을 103.01 l/h, 193.53 l/h 그리고 549.09 l/h로 증가 할 때 퇴적된 미립자들의 부유농도를 측정하였다.

점착성 미립자의 부유현상에 영향을 주는 기포간의 충돌을 방지하기위해 공기가스의 속도 u_{gl} 은 5 cm/s 이하로, 침강수주 지름은 10 cm - 20 cm안에 설계하였다(Deckwer와 Schumpe, 1985). 그림 7은 초기 농도 (C_0)가 각각 10,000 mg/l와 20,000 mg/l 일 때 공기 가스속도(u_{gl})의 증가로 인한 침식 및 현탁액 농도를 보여주고 있다. 즉 그림 7은 무차원의 측정높이 z/H (H : 기포투입 전의 전체 수위 높이, z : 측정지점의 높이)에 대한 부유농도변화를 나타낸다. 또한 1차원 침전-분산 모형식으로 계산한 값과 비교 분석하였다. 그림 7에 실선의 짝수번호는 식(3)을 통한 계산 값이며, 홀수 번호는 실측 부유농도를 말한다. 표 1에서는 실험 및 계산 조건들을 잘 나타냈으며, 기포가스속도 u_{gl} 를 0.205 cm/s, 0.27 cm/s, 0.76 cm/s로 변화시켰다. 초기농도가 10,000 mg/l 일 경우 공기압력변화 p_a 는 각각 0.179 bar에서 0.26 bar까지 증가한다(표 1). 여기서 기포투입 전 미립자(Al_2O_3)가 침강수주에서 침전된 후 응고된 시간은

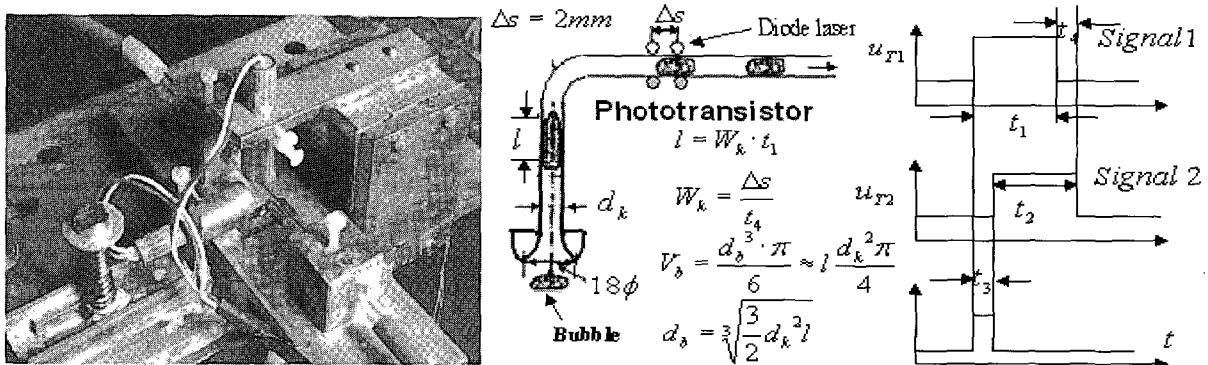


그림 6. 설치된 다이오드 레이저와 기포크기 측정원리

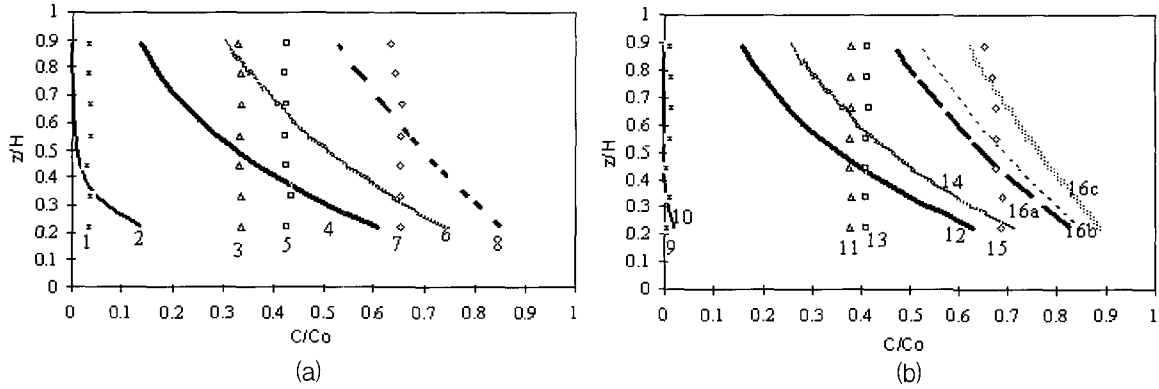


그림 7. 부유된 농도(Al_2O_3)의 실측치(홀수 번호)값과 실선 및 점선곡선으로 나타난 수치해값 비교

표 1. 부유농도(Al_2O_3) 측정 및 계산을 위한 실험조건

Test No.	$u_{gl}(cm)$	$C_0(mg/l)$	$P_a(bar)$	Temperature	Test No.	$u_{gl}(cm)$	$P_e(=u_s H/E_s)$	$C_0(mg/l)$
1	0.000	10,000	0.000	20.6 °C	2	0.000	0.100	10,000
3	0.205	10,000	0.179	20.9 °C	4	0.205	0.025	10,000
5	0.270	10,000	0.200	20.6 °C	6	0.270	0.019	10,000
7	0.760	10,000	0.260	20.5 °C	8	0.760	0.008	10,000
9	0.000	20,000	0.000	20.0 °C	10	0.000	0.200	20,000
11	0.205	20,000	0.183	20.6 °C	12	0.205	0.023	20,000
13	0.270	20,000	0.200	20.0 °C	14	0.270	0.017	20,000
15	0.760	20,000	0.290	20.1 °C	16a	0.760	0.006	20,000
					16b	0.760	0.008	20,000
					16c	0.760	0.0095	20,000

45분이며, 현탁액의 온도는 20.0°C이다. 침강수주 전체 900 mm 수위높이에서 7곳 지점의 부유된 연직농도를 측정하였다. 초기농도(C_0)가 10,000 mg/l에서 기포투입 전(without air) 침전되지 않고 부유되어 있는 무차원의 부유농도(C/C_0)는 약 0.035이하이며(그림 7(a)), 공기가스속도의 증가로 퇴적된 침전물의 현탁액이 증가한다. 예를 들면 초기농도가 10,000 mg/l에서 공기가스속도 u_{gl} 이 0.205 cm/s 일 때 무차원 부유농도가 0.3이며 기포를 투입 전 보다 10배 이상 증가하였다. 이때 공기압력은 0.179 bar 이다. 공기가스속도를 증가시켰을 ($u_{gl} = 0.270$ cm/s) 경우 점착성 퇴적물은 40%이상 침식 및 현탁액으로 부유되었다. 또한 초기농도(C_0)가 20,000 mg/l 일 경우도 실험 침강수주에서 기포가스속도 $u_{gl} = Q_{Luft}/A$ (Q_{Luft} : 투입된 기포체적, A : 단면적)의 증가로 부유농도는 증가한 것을 관측하였다. 현탁액 농도는 침강수주에서 공기가스속도 u_{gl} 이 0.205 cm/s 일 때 무차원 부유된 농도(C/C_0)는 0.3 ~ 0.4로 측정되었으며, 기포가스속도 u_{gl} 이 0.76 cm/s로 증가할 때 침전물 무차원 부유농도(C/C_0)는 0.6 이상된다. 부유된 침전물의 연직분포는 측정 높이와 관계없이 거의

동일한 분포현상을 보여주었다.

그림 7(a)와 (b)에서 알 수 있듯이 부유된 농도 계산을 위해 기포투입시 침강속도 u_s 및 분산계수 E_s 는 무차원 형태 안에서 Peclet수 $P_e(=u_s H/E_s)$ 를 사용하였다. Peclet수 값에 상관없이 계산된 농도값과 실측치 값은 큰 차이를 보였다. 그 이유는 침강수주에서 기포투입시 흐름형태에 영향을 주는 기포의 크기를 고려하지 않았기 때문인 것으로 생각된다. 또한 기포투입시의 침강속도 u_s 및 분산계수 E_s 를 측정하는데 매우 어려움이 있기 때문이다.

그림 8은 공기량이 변화할 때 현탁액 안에서의 측정된 기포의 크기 분포를 나타내었다. 초기 농도 C_0 가 10,000 mg/l에 기포량을 103.01 l/h($u_{gl} = 0.205$ cm/s) 투입하였을 때 측정된 기포의 평균직경 $d_m = d_{bi}/n$ (측정된 각각 기포지름 d_{bi} , 전체기포수 n)은 2.91 mm이고 549.09 l/h($u_{gl} = 0.76$ cm/s)일 때 3.42 mm로 증가하였다. 초기 농도 20,000 mg/l에서도 기포가스속도(u_{gl})가 0.205 cm/s 일 때 기포의 지름은 3.06 mm 이고 0.76 cm/s 일 때 기포의 지름은 3.57 mm로 증가하는 것을 관찰하였다. 기포량의 증가와 초기농도 C_0 증가로 기포의 융합현상이 일어난다.

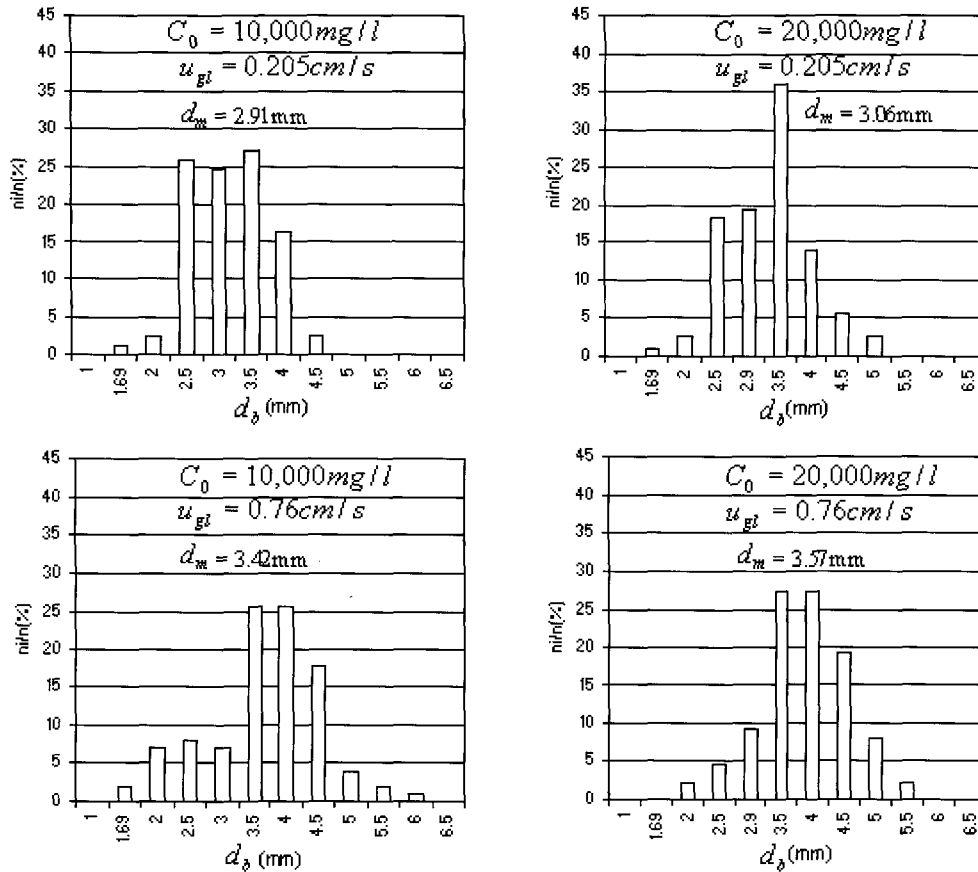


그림 8. 현탁액에서 기포의 크기 분포

그림 9는 공기 압력으로 인한 점착성 퇴적물 (kaolinite)의 상부표면에서 지름이 약 1/10 mm 크기의 volcano 현상을 볼 수 있었다. 기포투입으로 수압이 점착성 퇴적물 사이에 발생하여 미립자 사이에 물 흐름력이 증가하게 된다. 수압의 증가로 퇴적물 연결 고리가 파괴되어, 공극이 생겨 물 흐름이 하부에서 상부로 작은 기포입자와 함께 분출되어 volcano 현상을 일으킨다.

그림 10은 점착성 퇴적물의 부유농도에 1차원 침전-분산 모형에서 중요한 인자 중에 하나인 기포가스양 E_g 의 영향을 보여주고 있다. 퇴적물 미립자 0.25 Vol.-% (=

$(C_0/\rho_s) \times 100$)에 해당하는 침전물이 기포가스양 $E_g = (H_1 - H_0)/H_1$ (공기투입된 현탁액의 수심 H_1 , 공기투입이 되지 않았을 때의 수심 H_0)의 증가로 침강수주 연직 높이와는 상관없이 부유농도가 증가하는 것을 볼 수 있다. 부유농도는 높이 200 mm, 400 mm 그리고 800 mm 지점에서 관측하였으며, 응고 시간 45분 후 침전된 퇴적물에 기포압력을 증가시켰다. 무차원 기포가스(E_g)가 약 0.0217에서 0.05로 증가하였을 때 무차원 현탁액 농도(C/C_0)가 0.33에서 0.64로 증가하였다. 이때 기포 가스속도(u_{gl})는 0.205 cm/s와 0.76 cm/s이다.

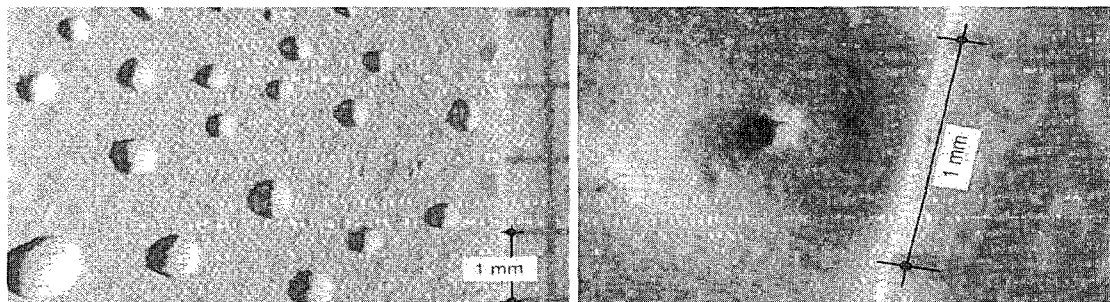


그림 9. 퇴적물(kaolinite) 안에 공기투입으로 생긴 간극

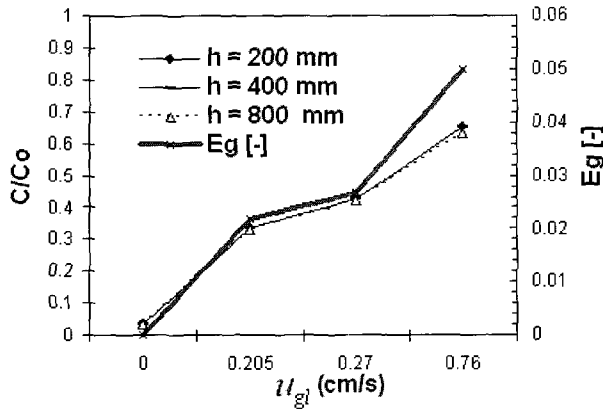


그림 10. 기포가스의 증가와 속도의 변화에서 침전물의 부유 현상

그림 11은 기포를 투입하여 점착성 침전물(Al_2O_3)을 현탁액으로 변환시킬 때 얼마나 점착성 퇴적물의 응집 시간이 부유현상에 영향을 미치는가를 나타내고 있다. pH 8.2에서 침강된 점착성 퇴적물을 각각 24, 72 그리고 190 시간 동안 응고시켰다. 부유농도의 측정 높이 지점은 500 mm이며, 퇴적물(Al_2O_3)은 0.5 Vol.-%($= (C_0/\rho_s) \times 100$)에서 10분 간격으로 기포량을 증가시켜 실험하였다. 공기압은 0 ~ 1.0 kPa 사이에 있다. 그림 11에서 알 수 있듯이 기포량 146.991 l/h에서 짧은 24 시간동안 응고된 퇴적물의 부유농도비가 0.75로 증가하였다. 이는 미립자 사이에 응집력이 작아 침식 저항력이 크지 않기 때문이다. 이와 반대로 같은 기포량에서 190 시간동안 퇴적물이 응고 되었을 때 약 0.28정도 적은 양의 부유농도가 측정되었다. 그 이유는 응고시간이 길수록 입자간의 거리와 공극이 작아져 응집 현상이 일어나 전단력이 상승했기 때문인 것으로 추측할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 기포 투입으로 난류흐름에서 퇴적된 점착성 광물질의 부유현상을 실험하였다. 미립자의 부유사 농도측정은 CCD-Camera를 이용하였으며, 현탁액에서 기포지름의 크기측정을 위해 다이오드 레이저를 사용하였다. 실험에서 알 수 있듯이 pH 8.1에서 기포투입 전 점착성 현탁액(Al_2O_3)이 45분 안에 전부 침전되며, 평균입자의 지름(d_m)이 산성에서 알칼리성으로 변화할 때 100 μm 이상 커지는 것을 관측하였다. 퇴적되어 응고된 광물성 미립자의 침식 및 부유시킬 수 있는 기포의 속도를 알아보기 위해 짧은 응고시간 45분 후 기포를 투입하였으며, 이때 침전된 점착성 퇴적물(Al_2O_3)의 입자간에 연결부위가 파괴되어 현탁액으로 변화하게 하는 한계 침식 기포가스속도(u_{gl})는 0.205

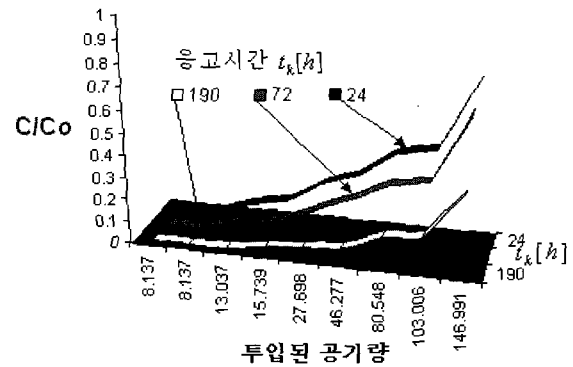


그림 11. 퇴적물 응고 시간에 따른 부유 농도의 변화

cm/s이하에 존재한다. 실험기 안의 기포가스속도(u_{gl})가 0.76 cm/s인 경우 pH 8.1에서 측정 지점에 상관없이 퇴적물(Al_2O_3)은 60 %이상의 부유물이 생기는 것을 측정하였다. 이때 기포량의 증가로 응집현상이 일어나 기포의 지름 크기가 커지는 것도 관측할 수 있었다. 응고 시간 45분 후 침전된 퇴적물(0.25 Vol.-%)에 기포량을 103.1 l/h에서 549.09 l/h로 변화시켰을 때 무차원 기포가스는 약 0.0217에서 0.05로 증가하였다. 또한 점착성 침전물의 응고 시간이 24, 92, 190 시간으로 변화할 때(여기서 공기압은 0에서 1.0 kPa사이에 있음) 기포량 103.006 l/h에서 응고시간에 상관없이 부유량이 급속히 증가하며, 응고시간 72 h에서 현탁액이 약 36 %정도 되는 것을 볼 수 있었다. 기포를 투입할 경우 1차원 침전-분산모형으로 계산된 부유입자의 농도와 실측치는 큰 차이가 있으며, 그 이유는 앞서 언급한 것처럼 기포의 크기를 고려하지 않았기 때문이다.

결론적으로 퇴적물의 저감을 위한 침식방법으로 종방향 흐름의 난류에 의한 전단력외에 기포투입으로 난류흐름을 발생시키는 압력충돌이 중요한 역할을 한다는 사실을 실험으로 입증하였으며, 항만, 호수 및 저수지에 쌓인 점착성 퇴적물을 기포투입으로 제거하는 기술적인 처리 가능성을 증명해보였다. 즉 투입된 기포는 응고된 점착성 퇴적물의 미립자사이에 존재하는 수압을 증가시키며, 물리-화학적 영향으로 응고된 미립자사이에 존재하는 유체를 하부에서 상부로 흐르게 하였다. 이로 인해 증가된 전단력이 한계 전단력 이상일 때 입자간의 연결부가 파괴되어 침식이 일어났으며, 미립자를 현탁액으로 변화시킬 수 있었다. 여기서 점착성 퇴적물의 부유현상에 기포수, 기포입자의 크기, 퇴적물 응고시간 및 기포입자의 속도가 중요한 인자라는 사실을 알 수 있었다. 그러나 이온성분이 다른 부유된 점착성 미립자

와 기포입자 또는 기포입자 사이에 충돌 및 전기화학적 인 작용아래 입자간의 거리가 가까워질 때 응집현상 일어났으며(그림 8), 이런 기포입자간의 응집현상은 기포입자의 지름을 커지게 한다. 그러므로 이런 기포의 응집현상은 점착성 입자의 부유현상을 크게 저해하므로 이에 대한 연구가 필요하다. 또한 점착성 유사 침식 및 부유 한계 조건은 비점착성 유사에 비해 변수들이 많기 때문에 그 정의 자체가 복잡하며, 기포입자의 크기를 고려하지 않은 1차원 침전-분산 모형식을 통한 부유농도의 예측은 매우 어려움이 있다. 그러므로 침식 및 부유에 중요한 물리적인 인자들(기포의 크기, 투입된 기포가스의 양, 기포가스의 속도, 응고시간)외에 미립토사의 결합력에 영향을 주는 함수비, 염분비(기포응집현상을 막음), 이온 교환 등의 인자들을 고려한 연구가 요구된다.

참 고 문 헌

Adu-Wusu, C., Yanful, E. K., and Mian, M. H. (2001). "Field evidence of resuspension in a mine tailings pond." *Can. Geotech. J.* Vol. 38, pp. 796-808.

Been, K., and Sills G. C. (1981). Self-weight consolidation of soft soils: an experimental and theoretical study. *Geotechnique* Vol. 31, No. 4, pp. 519-535.

Chapra, S. C. (1997). *Surface Water-Quality Modeling*. McGraw-Hill Book Company, pp. 295-297.

De Wit, P. J. (1995). *Liquefaction of cohesive sediments caused by waves*. Ph.D. dissertaion, Delft University of Technology.

Kato, Y., Nishiwiaki, A., Fukuda, T., and Tanaka, S. (1972). "The Behavior of Suspended Solid Particles and Liquid in Bubble Columns." *Journal Chem. Eng. Japan*, Bd. 5, Nr.2, S.112-118

Krone, R. B. (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.

Li, Y., and Mehta, A. J. (1994). "Mud fluidization by water waves." 4th *Nearshore and Estuarine Cohesive Sediment Transport Conference, Intercoch 94*; Wallingford, England; 11. 15. Juli

Mehta, A. J. (1986). *Characterization of cohesive sediment properties and transport processes in*

estuaries. In: A.J. Mehta(ed) *Estuarine Cohesive Sediment Dynamics*. Springer Verlag, pp. 290-325

Pralle, N., Külzer, M., and Gudehus, G. (2002). "Experimental evidence on the role of gas in sediment liquefaction and mud volcanism." *Geological Society of London, Special Publication Series*.

Smith, D. N., and Ruether, A. J. (1985). "Dispersed Solid Dynamics in a Slurry Bubble Column." *Chem. Eng. Sci.*, Vol. 4(5), pp. 741.

Teisson, C. (1991): "Cohesive Suspended Sediment Transport: Feasibility and Limitations of Numerical Modelling." *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 29, no. 6. pp. 755-769

Van Leussen, W. (1994). *Estuarine Macroflocs and their Role in Fine-grained Sediment Transport*. Ph.D. Thesis, University Utrecht.

Deckwer, W. D., und Schumpe, A. (1985). "Blasensaelen - Erkenntnisstand und Entwicklungstendenzen." *Chem.-Ing. Tech.* Vol. 57, S. 754-767, Deutschland(Germany).

Gudehus, G., and Külzer, M. (2002). Einfluss von Ionen und Gasblasen auf die Kollapsneigung feinstkörniger Böden. *Geotechnik* 25, Nr. 1, pp. 12-2, Deutschland(Germany).

Köhler, H. J. (1997). *Porenwasserdruckausbreitung im Boden, Messverfahren und Berechnungsansätze*. Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau, Nr. 75, Deutschland(Germany).

Mihopoulos, J. (1995). *Wechselwirkung Flockenbildung Flockenabtrennung unter Berücksichtigung der Durchströmungsmuster in Sedimentations- und Flotationsbecken*. Institut für Siedlungswasserwirtschaft, Universität Karlsruhe, Heft 72, Deutschland(Germany).

Osmann-Sigg, G. K. (1982). *Kolloidale und suspendierte Teilchen in natürlichen Gewässern*. Partikelgrößenverteilung und natürliche Koagulation im Zürichsee, Zürich, ETH, Diss.

Spork, V. (1997): *Erosionsverhalten feiner Sedimente und ihre biogene Stabilisierung*. Mitteilungen des Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft, RWTH Aachen, Band 114 Deutschland(Germany).

(논문번호:04-102/접수:2004.11.17/심사완료:2005.03.30)