

## 부유물질의 응집작용 및 침전특성에 관한 실험적 연구

추용식 · 박용안<sup>1</sup> · 이희준 · 박광순<sup>2</sup> · 권수재

한국해양연구소 해양지질연구단, <sup>1</sup>서울대학교 해양학과, <sup>2</sup>한국해양연구소 연안·항만공학연구센터

## An Experimental Study on Flocculation and Settling of Fine-grained Suspended Sediments

YONG SHIK CHU, YONG AHN PARK<sup>1</sup>, HEE JUN LEE,

KWANG-SOON PARK<sup>2</sup> AND SU-JAE KWEON

*Marine Geology and Geophysics Division, KORDI, Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea*

*<sup>1</sup>Department of Oceanography, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea*

*<sup>2</sup>Coastal and Harbour Engineering Research Center, KORDI, Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea*

염분도, 부유물질의 농도, 난류의 세기 및 점토광물의 함량이 세립질 부유물질의 응집과 침전특성에 미치는 효과를 규명하기 위하여 수조실험을 실시하였다. 염분도, 부유물질의 초기농도( $C_0$ ) 그리고 난류의 세기를 변화시켜면서 시간에 따른 농도 및 침전속도의 변화를 관찰하였으며, 동시에 수조의 저층에서 일정간격으로 부유물질을 채취하여 입도분석 및 점토광물의 함량비 변화와 입자 덩어리(floc)의 형성과정을 관찰하였다. 일정한 부유물질의  $C_0$  상태에서 염분도의 증가에 따라 중앙침전속도( $W_{50}$ )는 선형적인 증가를 보였다. 해수상태(33‰)에서 농도변화에 따른 침전특성은  $C_0$  범위에 따라 3가지 경우로 다르게 나타났다. 200 mg/l 이하의 범위에서는 농도변화에 따른 침전속도의 변화가 거의 일어나지 않았으며, 200~13,000 mg/l 범위에서는  $W_{50}=0.45C_0^{0.44}$ 의 상호관계식에 따라  $W_{50}$ 이 농도의 증가에 비례하며 가속화되었다. 한편, 13,000 mg/l 이상의 높은 농도 범위에서는 농도가 증가할수록 침전속도는 오히려 감소함을 보였다. 난류의 세기가 부유물질의 침전과정에 미치는 영향은 부유물질의 농도에 따라 다르게 나타났다. 상대적으로 부유물질의 농도가 낮아(500 mg/l) 입자간의 상호간섭이 활발하지 않은 상태에서는 난류의 발생은 입자간의 충돌기회를 증가시켜 응집작용과 침전을 촉진시키는 한편, 자연적으로 입자간의 충돌이 충분히 이루어지는 높은 농도(800 mg/l)에서는 난류의 발생은 오히려 상호 입자간의 분산과 간섭침전(hindered settling)을 일으켜 침전을 지연시켰다. 부동 유체 및 난류 발생 상태에서 모두 시간이 경과함에 따라 부유물질의 입도분포가 일어나며 입도분포의 왜도는 감소하고 침도는 증가하였다. 점토광물중에서 스�멕타이트가 가장 빨리 침전되는 반면, 일라이트가 가장 느린 침전속도를 보였다.

A laboratory flume experiment, using turbulence—generating acryl tank and natural sediments, was conducted to investigate the effects of salinity, concentration of suspended sediment, turbulence and clay minerals on the flocculation and settling of fine—grained suspended sediments. While experiments were run, a sequence of water samples were taken near the bottom of the tank to analyze the variations of size distribution and relative contents of clay minerals. The results of the salinity experiment indicate that median settling velocity ( $W_{50}$ ) increases linearly with salinity. Different settling processes of suspended sediments under variable concentrations appear to be predictable, depending upon the range of the suspension concentration. At concentrations less than 200 mg/l,  $W_{50}$  is rarely varied with concentration probably because of the individual—grain settling mode. In the range of 200 to 13,000 mg/l show  $W_{50}$  and concentration a good relationship following an empirical formula:  $W_{50}=0.45C_0^{0.44}$ . This relationship, however, no longer holds in concentrations exceeding 13,000 mg/l; instead, a more or less reverse one is shown. This result suggests an effect of hindered settling. The turbulence effect is somewhat different from that of concentration. Turbulence accelerates the flocculation and settling suspended sediments at low concentration (200 mg/l), whereas at high concentration turbulence breaks flocs down and impedes the settling. Size distribution of suspended sediments sampled near the bottom of the tank tend to be more negatively skewed and leptokurtic in turbulent conditions compared to those in static conditions. The clay mineral analysis from the sequential water samples shows that over time

the content of smectite decreases most rapidly with illite remaining concentrated in suspension. This means that smectite, among other clay minerals, plays the most effective role in the flocculation of fine-grained sediment in saline water.

서론

부유상태로 이동하는 세립질 퇴적물은 입자 사이에 작용하는 소성과 점착성으로 입자간의 상호결합을 통해 입자덩어리를 형성하며 침전되는 특성을 갖는다. 입자덩어리의 형성은 단순히 입자크기에 따라서만 결정되는 것은 아니며 일차적으로 부유물질 내 점토광물의 함량과 그 점토광물의 결합력에 기인하고 그 외에 여러 가지 환경요인에 따라 변화한다(McCave, 1983). 즉, 염분, 부유물질의 농도, 수리에너지의 세기, pH, 온도 등의 물리·화학적 요인과 부유물질의 입도구성, 광물학적 성분 등의 퇴적물의 물성에 따라 여러 가지 복합적인 요인의 영향을 받으면서 진행된다(추, 1993).

세립질 부유물질의 침전특성에 관한 본격적인 연구는 Einstein and Krone(1962)으로부터 이루어졌으며, Krone(1962, 1963)과 Partheniades(1965) 역시 이 분야에 대한 많은 연구와 응용에 대한 기초를 형성하였다. 특히 Partheniades(1965)는 점착성 세립질 퇴적물의 특성을 나타내는 인자로서 입자사이의 전기화학적 결합력과 물리화학적 성질을 부각시켜 두 인자가 선형관계에 있다고 가정하고 침식률과 저면 전단응력간의 관계에 대한 합리적인 설명을 제안했다. 현장실험에 의한 연구는 1970년대 들어 주로 Gibbs(1977), Owen(1970), Conomos and Peterson(1976) 등에 의해 활발히 이루어져 각각 아마존, 템즈강, 샌프란시스코 만에서 많은 관측을 실시하였다. 1980년대 들어서는 Mehta (1986), Parchure and Mehta(1985), Hayter(1983, 1986) 등이 수치 해석을 이용한 부유물질의 이동모델을 연구하였으며, 그 밖에 Sheng(1983), Krank(1986), Nicolson and O'Connor(1986), Leussen (1988) 등이 이 분야에 대한 연구를 활발히 하였다. 한편, 강(1984)은 실험을 통해 전단흐름에 의한 퇴적물의 재부유 그리고 퇴적물의 입도가 재부유와 퇴적에 미치는 영향에 대한 연구를 수행하였다.

하지만, 부유물질의 응집 및 침전과정에 대한 정확한 이해를 위해서는 해양에서 발생할 수 있는 여러 환경요인의 변화에 따른 한계 전단응력의 변화, 입자간의 결합과정, 침전속도의 변화 그리고 침전 및 퇴적조건 등과 같은 보다 정확한 현상학적인 이해와 정량적인 상관관계 추정에 대한 연구들이 요구되지만, 아직은 미흡한 상태이다. 또한 수층내 부유물질의 응집작용은 퇴적물의 구성성분에 따라 서로 다른 결과를 보일 수 있어 여러 자연 환경상태의 퇴적물을 이용한 다각적인 연구가 실시되어야 한다. 따라서 본 연구는 자연시료를 이용한 침전실험을 통해 한국 서해 연안에서 이루어지고 있는 여러 가지 환경요인 변화에 따른 부유물질 입자간의 응집 및 그에 따른 침전특성을 규명하고자 하였다.

실험장치

실험장치는 수조, 난류발생장치, 부유물질의 농도 측정장치 등으로 크게 3가지로 구분된다. 실험에 사용된 수조는 두께 10

mm의 투명 아크릴을 사용하여 254×254×460 mm의 크기로 제작하여 수조의 윗면을 개방시켰으며, 외부로부터는 난류를 발생시키기 위한 격자망이 연결되어 상하 왕복운동을 한다. 한편 오른쪽 측면에는 일정량의 부유물질을 채취하기 위해 직경 1 cm의 구멍을 뚫어 호스로 연결해 놓았다(Fig. 1).

난류발생장치로는 Thompson and Turner(1975), Hopfinger and Toly(1976) 그리고 Dickson and Long(1983) 등이 성층화된 밀도층의 혼합과정을 실험하기 위하여 사용했던 장치를 응용 제작하여 사용하였다(Fig. 1). 이 장치는 진동전달 구동장치(1/2 HP)와 수조내부를 일정간격으로 상하 연직운동을 하는 아크릴 격자망으로 이루어져 있다. 실험장치에서 발생한 난류의 세기는 난류의 수평성분속도( $u$ )와 격자망의 진동주기( $f$ ), 스트로크( $S$ ), 격자의 크기( $M$ )와의 관계 및 격자망으로부터의 거리( $d$ )에 따른 난류 강도와와의 관계를 도출하여 정량화하였다(추, 1993; 박 등, 1996).

$$u = Tfs^{3/2}M^{1/2}d^{-1} \tag{1}$$

여기서,  $T$ 는 상수이다.

실험수조의 일정층에서의 시간에 따른 부유물질의 농도변화 측정을 용이하게 하기 위해서 광학 농도측정장치를 이용하였다. 이 장치는 광센서로 수층내 부유물질을 거친 빛의 투과량을 측정해 농도를 잴수 있는 장치로서 광센서로부터의 신호는 계측 자료를 소형컴퓨터와 아날로그/디지털 변환기(A/D Converter)에

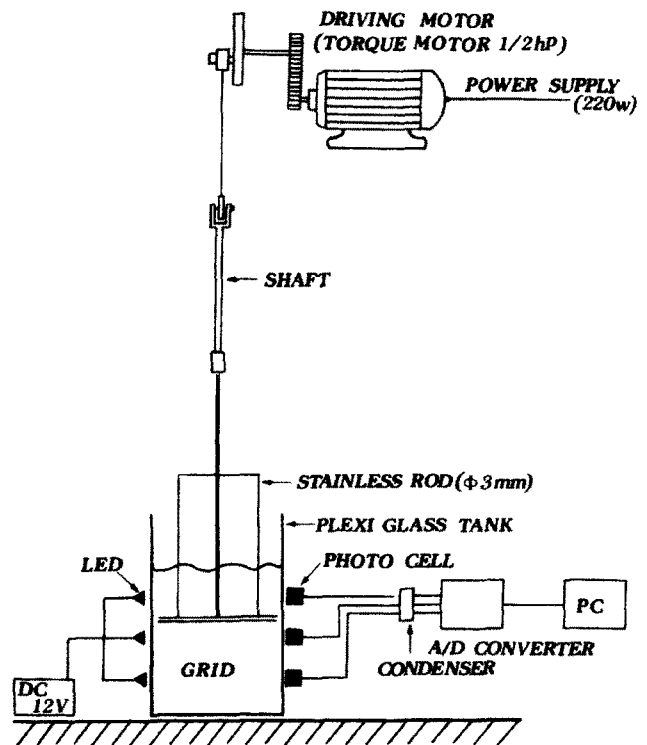


Fig. 1. Schematic diagram of the experimental installation.

의해 처리하는 자료취득 및 디지털화 시스템(Lab Master DMA, Scientific Solution사)을 이용하여 컴퓨터에 입력된 자료를 환산하여 시간별 부유물질의 연속적인 농도변화를 연속적으로 측정하였다.

수조의 3개층 즉 상층(바닥으로부터 35 cm), 중층(바닥으로부터 20 cm), 저층(바닥으로부터 5 cm)에서의 부유물질의 농도를 연속적으로 측정함으로써 부유물질의 침전속도를 계산하였다. 실험에 사용된 수조에서는 3차원의 속도성분  $u, v, w$ 가 무시될 수 있고 농도와 같은 변수의 수평변화 역시 무시될 수 있으므로 농도( $C$ )의 연직변화는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} [W_s C + A_z \frac{\partial C}{\partial z}] \quad (2)$$

양변을 수심  $h$ 에 대하여 연직 적분하면,

$$\begin{aligned} h \frac{\partial \bar{C}}{\partial t} &= [W_s C + A_z \frac{\partial C}{\partial z}]_{z=h} - [W_s C + A_z \frac{\partial C}{\partial z}]_{z=0} \\ &= [W_s \bar{C} + A_z \frac{\partial \bar{C}}{\partial z}]_{z=0} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서,  $W_s$ 는 침전속도,  $z$ 는 바닥으로부터의 높이,  $A_z$ 는 와동 확산계수 그리고 수심 평균농도  $\bar{C} = \frac{1}{h} \int_0^h C dz$  이다.

위 식 (3)에서 좌변  $h \frac{\partial \bar{C}}{\partial t}$ 는 단위면적의 물기둥에서 단위시간당 부유물질 농도의 감소를 나타내고, 우변은 단위면적의 바닥에 단위시간당 퇴적되는 퇴적물의 양을 나타낸다. 수중에서 부유물질의 이동은 이류와 확산에 의해 이루어지는데, 식 (3)의 경우 정지된 유체상대에서는 농도의 변화가 수직이류에 의한  $W_s \bar{C}$ 만 존재하게 되고, 난류가 형성되는 상태에서는 이류와 함께 분산에 의한  $A_z \frac{\partial \bar{C}}{\partial z}$ 가 작용하여 수직농도의 변화를 일으킨다. 따라서, 이 실험에서의 침전속도는 수조의 상·중·저층에서 연속적인 농도측정을 하여 식 (3)에 의하여 구하였다. 이때 일정 단위면적(일정층)에서 단위시간당 농도의 변화는 단위면적의 거리변화에 따른 농도의 변화로 구하였다.

### 실험재료 및 방법

일정한  $C_0$ 를 가지는 혼탁수를 만들기 위한 퇴적물 시료로는 한국 서해 남양만의 상부조간대에서 채취한 표층퇴적물을 4φ 체로 습식체질을 한 후 세립한 니질퇴적물만을 사용하였다. 준비된 시료의 평균입도는 26.07  $\mu\text{m}$ 이고, 중앙입도( $D_{50}$ )는 19.57  $\mu\text{m}$ 로서 실트에 속한다(Fig. 2). 점토광물의 함량은 일라이트가 40.8%로 가장 많은 함량을 보이고 스멕타이트가 14.7%, 고령석이 22%, 그리고 녹니석이 23%로서 고령석과 녹니석이 거의 1:1 함량비를 나타내고 있다(Fig. 3).

매회 실험시작시 실험수조에  $C_0$ 를 일정하게 맞춰서 침전시켜 서로 다른 염분도, 농도 그리고 난류의 세기에 따른 침전과정의 변화를 관찰하였다. 먼저 염분도의 변화가 부유물질의 응집과정 및 침전에 미치는 영향을 파악하기 위해 실험 시작시 수조내

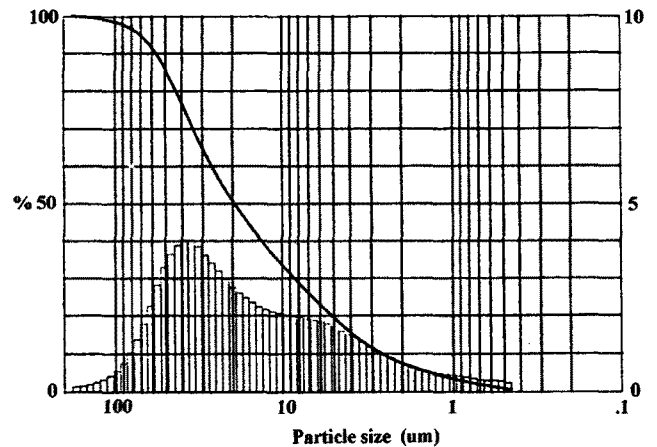


Fig. 2. Particle-size distribution of the fine-grained sediments prepared by wet sieving through a 64  $\mu\text{m}$  sieve for the experiments.

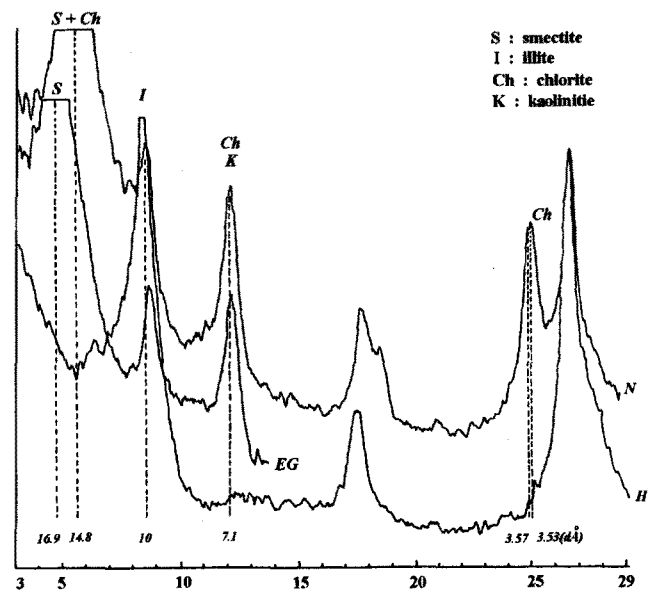


Fig. 3. X-ray diffractogram of the sediment used for the experiment. N, EG and H denote 'normal (untreated)', 'ethylglycolated' and 'heated (to 550°C)' respectively. There is a shift of peak from 14.8Å to 16.9Å in the diffractogram of the ethylglycolated sample relative to the normal one.

부유물질의  $C_0$ 가 200 mg/l 와 500 mg/l의 두가지 경우에 대하여 염분도를 조정하였다. 각각의 경우 자연염을 첨가하는 방법으로 실험수의 염분도를 담수에서 완전한 해수까지(0, 2, 5, 10, 20, 33%) 변화시켜 가며 실험을 하였다. 부유물질의 농도영향을 고려한 실험은 난류가 존재하지 않는 부동유체상태로 염분도가 33%로 고정된 해수에서 100 mg/l~15,000 mg/l 범위내에서  $C_0$ 를 변화시키며 실시하였다. 결과적으로 각각의 경우에서의  $W_{50}$ 를 구하여 농도조건과의 상관관계를 ' $W_{50} = kC_0$ '(Krone, 1962)에 의해 나타내었다. 여기서  $W_{50}$ 이란 일정한  $C_0$ 를 가지는 부유물질이 침전되기 시작하여 50%의 퇴적물이 침전되었을 당시의 침전속도를 말하며, 이를 각 실험조건에서의 침전속도 대 표값으로 표현하였다.

한편, 항상 유동상태인 실제 해양환경을 재현하고자, 실험장

**Table 1.** Experimental conditions and calculated parameters under turbulence

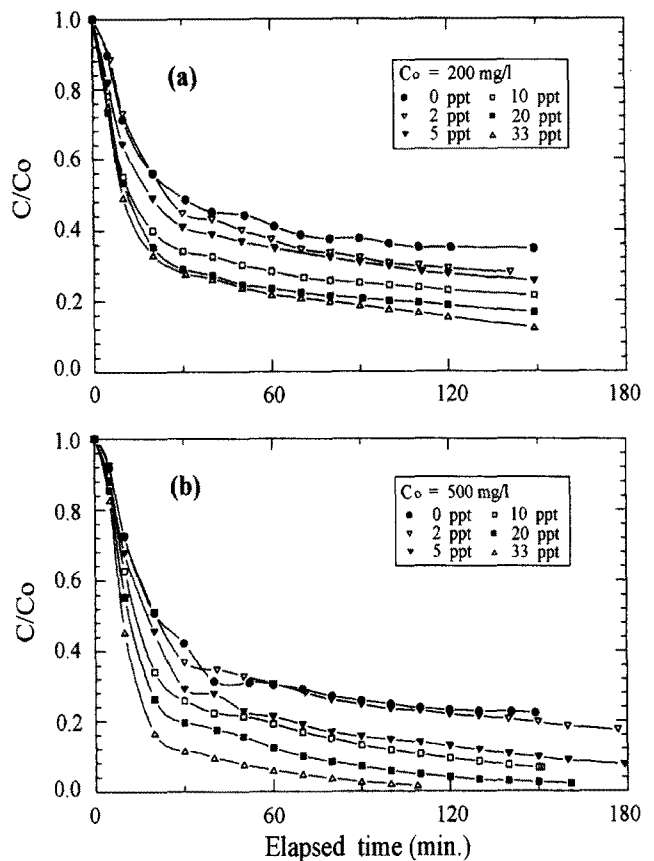
Expeimental No.	Initial Conc. (mg/l)	Oscillation stroke (cm)	Frequency (Hz)	Energy dissip. rate (cm <sup>2</sup> /sec <sup>3</sup> )	Turbulent shear G (sec <sup>-1</sup> )	Shear stress (dyne/cm <sup>2</sup> )
1		0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	200	8	0.7	11.0	33.1	0.3
3		8	1.5	108.0	103.8	1.0
4		0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	500	8	0.7	11.0	33.1	0.3
6		8	1.5	108.0	103.8	1.0
7		0	0.0	0.0	0.0	0.0
8	800	8	0.7	11.0	33.1	0.3
9		8	1.5	108.0	103.8	1.0

치에서 격자망(Fig. 1)의 상하 진동주기를 변화시켜 0.3과 1.0 dyne/cm<sup>2</sup>의 저면 전단력에 상응하는 난류를 발생시키면서 부유물질의 침전과 난류와의 관련성을 관찰하였다. 이때 C<sub>0</sub>를 200, 500, 800 mg/l로 고정시키고 난류의 강도를 변화시키며 실험을 실시하였다(Table 1). 난류를 발생시킨 경우인 Table 1의 4, 7, 8, 9번 실험조건에서 침전에 따른 부유물질의 입도분포의 변화과정을 관찰하였다. 수조측면에 뚫어 놓은 구멍을 통해서 일정시간(0, 10, 30, 60, 120, 240분)이 경과후 100 ml의 샘플을 취한 즉시 부유물질 입도분석기(Malvern, 3600E)로 입도분석을 실시하였다. 한편 채취된 샘플의 일부는 슬라이드 글라스로 옮긴 후 광학현미경으로 관찰하였다. 또한 7, 8번 실험조건(Table 1)에서 시간의 경과에 따라 각각 약 21의 샘플을 취하여 점토광물분석을 실시하였다. 각 샘플의 농도를 높이기 위하여 일차적으로 원심분리기로 농축시킨 다음 30% 과산화수소수로 유기물을 제거하고, 다시 원심분리기로 농축시켜 스포이드로 슬라이드글라스에 떨어뜨려 자연건조시키는 방법으로 정방위 시료를 제작하였다. 이렇게 준비된 시료는 i) 아무런 처리도 하지 않은 상태와 ii) 60°C에서 에틸렌글리콜 증기로 처리된 시료에 대하여 각각 X-선 회절분석기(RIGAKU MD MAX/III)를 이용하여 분석하였다.

**결과 및 토의**

**염분도에 의한 전기화학적 결합력의 변화**

부유물질의 C<sub>0</sub>가 200 mg/l로 주어졌을 때, 저층에서 부유물질의 농도가 C<sub>0</sub>의 50%로 감소하는 시간이 0%의 담수에서는 30분이 소요되었고, 2%의 염분도 상태에서는 25분, 5%일 때는 20분, 10%일 때는 15분, 20%일 때는 12분, 그리고 완전한 해수상태인 33%에서는 10분이 소요됨으로써 염분도의 증가에 따라 대수합수 관계를 보이며 농도감소율이 증가하였다(Fig. 4a). W<sub>50</sub>은 담수 상태에서 0.16 mm/sec 정도로 낮은 값을 보이지만, 33%에서는 0.328 mm/sec로 염분도의 증가에 따라 선형적인 관계를 가지고 계속적인 증가를 보였다(Fig. 5). C<sub>0</sub>를 500 mg/l로 고정하고 동일한 실험을 반복한 결과, 저층에서 C<sub>0</sub>가 50%로 감소하는데 소요되는 시간이 담수 상태에서는 25분, 2%의 경우 22분, 5%의 경우 20분, 10%의 경우 15분, 20%의 염분도에서는 12분, 그리고 완전한 33%에서는 9분 정도의 시간이 소요됨으로써 역시 대수합수



**Fig. 4.** Time variation of suspended sediment concentrations at the lower part of the tank under different salinities: (a) C<sub>0</sub>=200 mg/l; (b) C<sub>0</sub>=500 mg/l.

관계를 보이며 C<sub>0</sub>가 200 mg/l보다 빠른 농도 감소율을 보였다(Fig. 4b). 관측된 W<sub>50</sub> 역시 담수상태에서는 0.18 mm/sec이었으며, 염분의 증가와 함께 점차적으로 선형적인 증가를 보여 33%의 경우 0.77 mm/sec의 값을 보였다(Fig. 5).

염분도의 변화는 입자간의 결합력의 세기에 상당한 영향을 미쳐 낮은 염분도에서도 입자의 응집작용이 일어나게끔 하며, 특히 음으로 전하된 점토광물과 이온반응을 활발히 일으킨다(Burt, 1984). 본 실험의 결과 염분도의 변화에 따른 중앙 침전속도의 변화양상은 Krone(1962)이 부유물질의 침전속도에 해수의

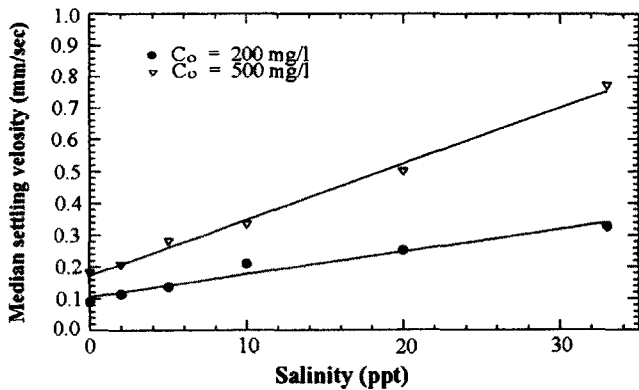


Fig. 5. Observed median settling velocities for different salinities from 0 to 33‰ with the two suspension concentrations of 200 and 500 mg/l each.

염분이 미치는 효과는 10%까지는 지수함수적인 증가를 보이는 반면, 그 이상의 염분도에서는 거의 일정하다고 보고한 결과와는 달리 나타났다. 하지만, Owen(1970)의 연구결과와는 비슷하게 선형적인 증가를 보였으며, 각각의 주어진 염분도 상황에서 전체적인 중앙침전속도는 약간 더 크게 나타났다. 이와 같이 기존의 연구결과와 약간의 차이를 보이는 이유는 실험에 사용된 시료의 불성차이 때문으로 사료된다.

**부유물질 농도증가에 따른 충돌 효과**

부동 유체상태에서 염분도는 33‰의 해수상태로 고정시키고 부유물질의  $C_0$ 를 각각 달리하여 침전 실험을 실시한 결과, 저층에서 시간의 경과에 따른 농도변화를 Fig. 6에 나타내었다. 시간의 경과에 따라 침전이 급속히 진행되었으며 100 mg/l와 200 mg/l인 경우를 제외한 나머지 모든 조건에서 6시간이 경과한 후 부유물질의 농도는  $C_0$ 의 약 10% 이하로 감소하였다.  $W_{50}$ 은  $C_0$ 가 100 mg/l인 경우와 200 mg/l인 경우에 거의 차이가 없었지만,  $C_0$ 가 8,750 mg/l까지 증가하는 과정에서  $W_{50}$ 은 계속적인 증가를 보였다(Table 2). 하지만 15,000 mg/l로 농도가 높아짐에 따라  $W_{50}$ 이 약간의 감소를 보여 침전이 느리게 진행되었다. 본 실험의 결과는 기존의 연구(Krone, 1962; Thorn, 1981)에 의해

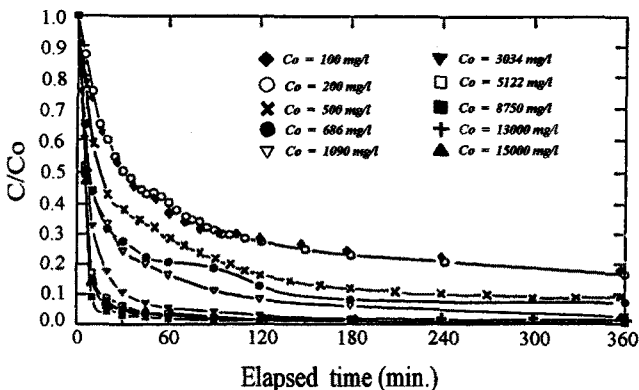


Fig. 6. Time variation of suspended sediment concentrations at different initial concentrations ( $C_0$ : initial concentration;  $C$ : instant concentration).

Table 2. Median settling velocities and settling modes at different concentrations of suspended sediments

Type	Init. Conc. (mg/l)	$W_{50}$ (mm/sec)	Settling mode
I	100	0.17	Individual-grain settling
	200	0.16	
	500	0.32	
	686	0.41	
II	1,090	0.44	Brownian motion, Differential settling
	3,034	0.72	
	5,122	0.86	
	8,750	1.02	
	13,000	1.15	
III	15,000	0.92	Hindered settling

규명되어온 바와 같이 부유물질의 침전속도는 농도의 함수로 가장 크게 좌우된다는 사실을 재확인시켜 주고 있다. 초기농도 변화에 따른 부유물질의 응집과정 및 침전특성은 농도범위에 따라 다음과 같이 3가지 경우로 해석될 수 있다. 첫째, 초기농도가 200 mg/l 이하로 주어진 경우는 입자들간의 상호간섭이 없고 충돌횟수가 적게 일어남으로써 주어진 수리학적 상태에서 농도의 변화와 무관하게 침전속도는 일정하다. 둘째, 200~13,000 mg/l의 농도범위에서는 입자들간의 상호간섭이 활발하여 충돌 기회가 증가하여 응집작용이 증가함으로써 농도의 증가에 따라 침전속도도 빨라진다. 셋째, 13,000 mg/l 이상의 높은 농도에서는 너무 높은 농도에 의한 부유물질간의 상호간섭으로 인해 부유물질의 침전이 제한됨으로써 오히려 간섭침전(Krone, 1962; Mehta, 1986)이 일어나기 때문으로 볼 수 있다. 하지만, 위와 같은 3가지 농도범위를 구분하는 경계는 부유물질의 입도구성, 점토광물의 함량 그리고 유기물질의 함량 등에 따라 약간의 변동이 일어날 수 있다(Thorn, 1981; Mehta, 1986). 특히 지속적으로 난류가 존재하고 있는 실제 해양환경에서는 입자들의 상호간섭이 일어나지 않는 범위(200 mg/l 이하)가 크게 낮아질 것으로 사료된다.

입자간의 충돌이 많아 응집이 활발히 이루어지는 농도에서는 부유되어 있는 개개 입자가 응집작용을 거쳐 최종 입자덩어리의 크기에 도달하면, 침전속도  $W_s$ 와 농도  $C$ 는 Krone(1962)에 의해 제시된 경험식 ' $W_s = KC^n$ '에 따라 상관관계를 갖는다. 본 연구의 경우 입자간의 상호충돌이 활발히 이루어지는 농도범위 (200~13,000 mg/l)에서 중앙침전속도와 초기농도와의 상호관계를 구한 결과 아래의 식 (4)와 같다.

$$W_{50} = 0.45C^{0.44} \tag{4}$$

Krone(1962)은 샌프란시스코 만 퇴적물로 실험을 실시한 결과, 경험식에서 상수  $n$ 은 1.33이라 보고하였고, Migniot(1968)는  $n$  값이 거의 1에 가깝다고 보고하였다. 한편, Thorn(1981)은 영국 세번(Severn) 하구의 퇴적물을 이용하여  $K$ 는 0.513,  $n$ 은 1.29임을 밝혔다. 본 실험의 결과가 Thorn(1981)의 결과에 비해 농도에 따른 침전속도의 증가율이 낮고 또한 기존 연구자들의 상수  $n$ 값에 비해 낮게 나타난 것은 실험에 사용된 시료의 입도조성과 광물성분의 차이에 있다고 사료되며, 특히 실험에서 사용

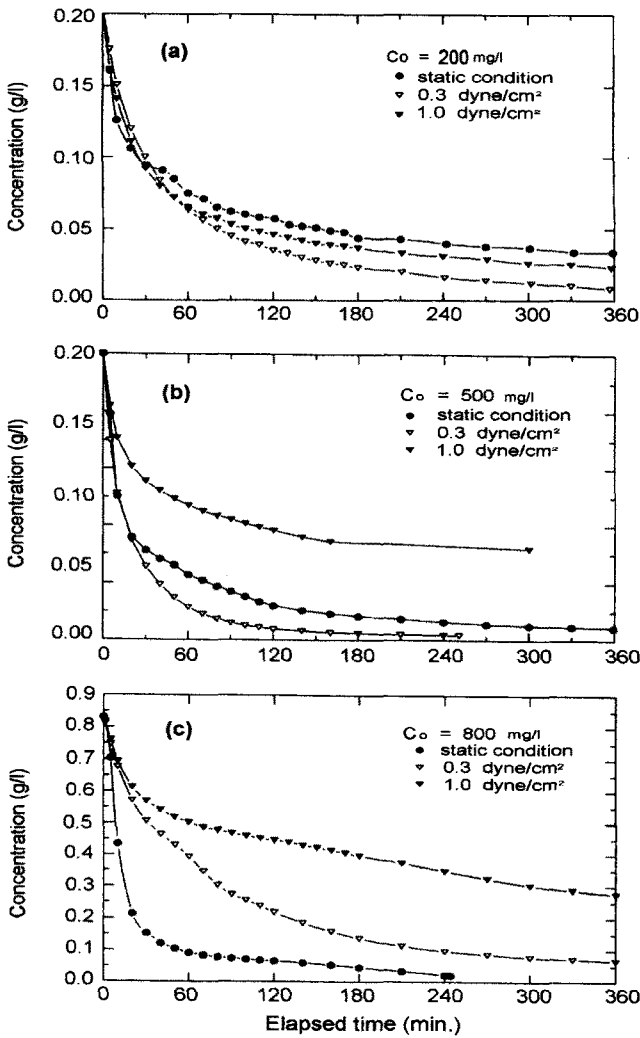


Fig. 7. Time variation of suspended sediment concentrations under different turbulent kinetic energies with the three initial concentrations: (a) 200 mg/l; (b) 500 mg/l; (c) 800 mg/l.

된 시료의 입도가 기존 연구자들이 사용한 10  $\mu\text{m}$  이하의 입도 분포 보다 조립한 분포를 보여(Fig. 2) 입자간의 응집효과가 상대적으로 크지 않기 때문인 것으로 판단된다.

**난류와 부유물질 농도의 상호작용에 따른 침전속도의 변화**

격자망의 진동수( $f$ )를 0.7과 1.5로 조절함으로써 각각 0.3과 1.0 dyne/cm<sup>2</sup>의 저면 전단력을 발생시킨 경우에 대하여  $C_o$ 를 변화시켜 가며 실험을 실시하였다. 200 mg/l의 경우에서 난류발생에 따른 저층에서의 시간별 농도변화는 Fig. 7a에 나타낸 바와 같다. 약 30분이 경과할 때까지는 난류의 발생과 무관하게 거의 유사한  $W_s$  값을 가지지만, 30분이 경과한 후부터는 난류의 강도가 증가할수록 침전이 빨리 진행된다(Fig. 8). 이 농도값은 입자간의 상호간섭이 거의 일어나지 않는 범위의 경계값으로서 부동 유체상태에 비해 난류가 약간 발생함에 따라 입자간의 충돌 기회가 커지고 응집작용이 활발해짐에 따라  $W_s$ 가 빨라지는 양상을 보인다(Figs. 7a and 8b). 하지만 난류가 더욱 증가하여 1.0 dyne/cm<sup>2</sup>의 전단력을 가지는 상태의 경우 입자의 충돌기회가 더

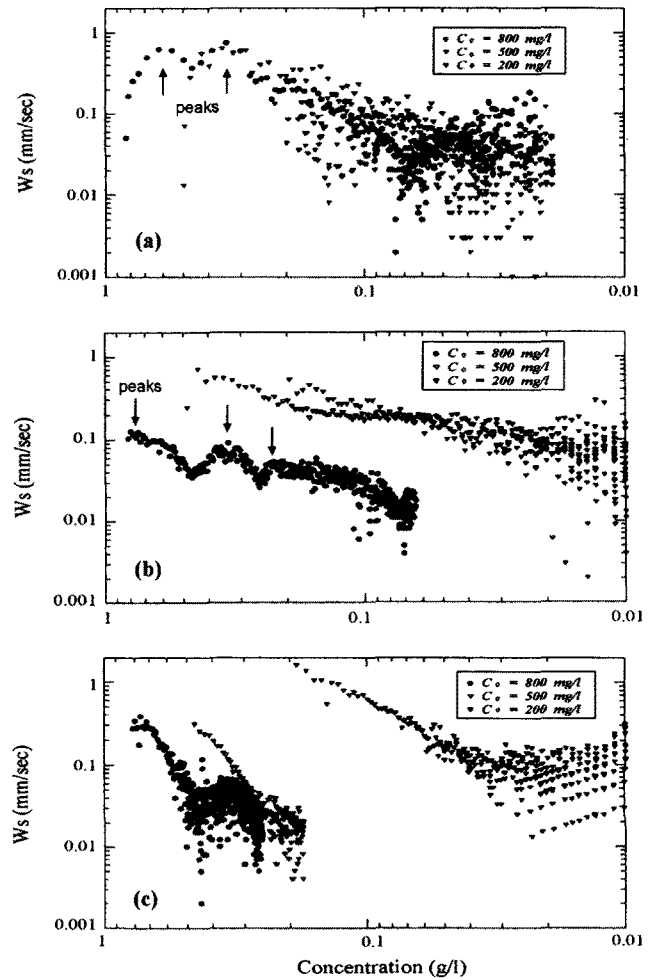


Fig. 8. Time series of settling velocity vs. suspension concentration at different initial concentrations and turbulent kinetic energies: (a) static condition; (b) 0.3 dyne/cm<sup>2</sup>; (c) 1.0 dyne/cm<sup>2</sup>.

많아지는 반면, 입자덩어리의 침전과 바닥으로의 결합에 대한 난류의 방해(upward flux)가 커져 실제적인 유효 침전속도( $W_s$ )는 감소해 침전이 지연되는 것으로 사료된다(Figs. 7a and 8c).

초기농도  $C_o$ 가 500 mg/l인 경우 난류의 변화에 따른 저층에서의 농도 변화를 살펴보면(Fig. 7b), 약 15분이 경과할 때까지는 난류의 발생과 무관하게 유사한  $W_s$  값을 보이지만 그 이후부터는 난류의 발생과 상관하여 큰 영향을 받는다. 저면 전단력이 0.3 dyne/cm<sup>2</sup>으로 가해짐에 따라 부동유체 상태에 비해 보다 빠른  $W_s$  값을 보이지만(Fig. 8b), 1.0 dyne/cm<sup>2</sup> 전단력이 가해지는 상황에서는 오히려 더 느린  $W_s$  값을 가지며  $C_o$ 의 40% 정도가 침전되지 않고 부유상태로 남아있다(Fig. 7b). 이는 Patheniades (1965)가 제시한 부유물질의 모든 침전조건에서 일정 전단력에 대한 평형상태 농도의 퇴적물이 부유상태로 남아 있다고 보고한 사실과 일치된다.  $C_o$ 가 500 mg/l인 상태는 차별침전으로 인한 입자간의 상호간섭이 활발하게 일어나는 범위에 속하기 때문에(Table 2), 부동 유체상태에서도 응집이 잘 일어나 7분 정도 경과할 때  $W_s$  값이 0.6 mm/sec까지 증가한다(Figs. 7b and 8a). 0.3 dyne/cm<sup>2</sup>의 전단력이 존재할 때는 3분 정도 경과시 0.72 mm/sec까지 증가하며(Figs. 7b and 8b), 전단력이 1.0 dyne/cm<sup>2</sup> 일때는

최대 침전속도까지의 도달 시간이 더욱 짧아져서 0.98 mm/sec까지 증가한다(Figs. 7b and 8b).

$C_o$ 가 800 mg/l인 경우 약 5분 경과시까지는 난류의 발생과 무관하게 거의 유사한 침전시간을 보이지만, 그 이후부터는 난류의 강도에 따라 부유물질의 침전이 지연됨을 확연히 알 수 있다(Fig. 7c).  $W_s$  값의 변화를 보면, 초기농도가 200, 500 mg/l인 경우와는 약간 다른 양상을 보인다(Fig. 8). 부동 유체상태에서 시간에 따른 침전속도의 변화는 초반에 두 개의 피이크를 보인다(Fig. 8a). 처음 나타난 피이크는 조립한 입자들의 침전속도를 나타내는 것이고, 두 번째 피이크는 세립한 입자들의 응집작용에 기인한 것으로 사료된다.  $C_o$ 가 낮은 경우(200, 500 mg/l)와 달리 약한 난류(0.3 dyne/cm<sup>2</sup>)의 발생에도  $W_s$ 가 뚜렷히 감소되는 경향을 보였다(Fig. 8b). 전단력이 1.0 dyne/cm<sup>2</sup>으로 증가하면서 초반에  $W_s$ 의 약한 증가가 나타나지만 점차적으로 낮아지는 경향을 보이고 있다(Fig. 8c).

이와 같이 난류의 발생은 부유물질의 농도 조건에 따라 응집작용을 촉진시키기도 하지만 입자덩어리를 분산시키는 반대 작용도 하는 것으로 사료된다. 결과적으로 응집작용으로 이루어진 입자덩어리의 크기는 입자간의 결합력과 난류의 강도로 결정될 수 있다. Owen(1971)은 탱크장 하구에서 부유물질의  $W_s$  값을 현장관측한 결과, 대조시에 농도의 증가에 따라 거의 선형

적으로 증가하는 한편, 소조시에는 부유물질 농도의 제곱에 비례한다는 사실을 발견했다. 즉, 소조시의  $W_s$  값이 항상 대조시보다 높은 값을 나타내고 농도의 영향을 더 많이 받는다는 것이다. 이는 대조와 소조시를 난류에너지의 개념으로 생각해볼 때 대조시에 비해 상대적으로 약한 소조시의 난류에너지는 응집작용을 촉진시키는 효과를 가져오며, 대조시의 강한 난류에너지는 입자덩어리를 분산시킨다는 사실을 뒷받침해준다.

**부유물질의 입도분포 변화와 입자덩어리의 형성**

초기농도  $C_o$ 가 500 mg/l와 800 mg/l인 경우 각각 부동 유체 상태와 난류가 존재한 상태의 실험에서 일정 시간 간격으로 부유물질을 채취하여 입도분석을 실시한 결과, 시간의 경과에 따라 입도의 분급이 일어나며 난류가 존재하는 조건에서 부동 유체 상태에서 보다 왜도 값이 감소하고, 첨도는 증가하였다. 부동 유체 조건에서  $C_o$ 가 500 mg/l로 주어진 경우 초기 시료의  $D_{50}$ 은 13.4  $\mu$ m이고, 7  $\mu$ m와 37  $\mu$ m의 쌍최빈값의 입도분포를 보였다. 하지만 침전이 진행되면서 약 30분 경과 후부터 10  $\mu$ m 이하의 단최빈값을 보이면서 세립화 되었다(Fig. 9a, Table 3).  $C_o$ 가 800 mg/l로 주어진 경우 초기 시료의  $D_{50}$ 은 19.6  $\mu$ m이고, 5.5  $\mu$ m와 35  $\mu$ m에서 최빈값을 가지는 약한 쌍최빈 분포를 보이다가 10분 경과 후부터 세립한 쪽으로 상당한 입도분포의 변화를 나타내는 입도분급이 일어나 단최빈 분포를 보이기 시작한다(Fig. 9b). 30분 경과 후에도 조금씩 세립해지는 입도분포 변화를 보이지만 변화폭이 상대적으로 적다(Table 3). 즉 부유물질의 농도가 높을수록 입자덩어리의 형성과 침전이 빨리 진행되는 것을 증명해 준다. 한편,  $C_o$ 가 800 mg/l인 상태에서, 0.3 dyne/cm<sup>2</sup>의 전단력이 존재하는 경우 부동 유체 조건에서 보다

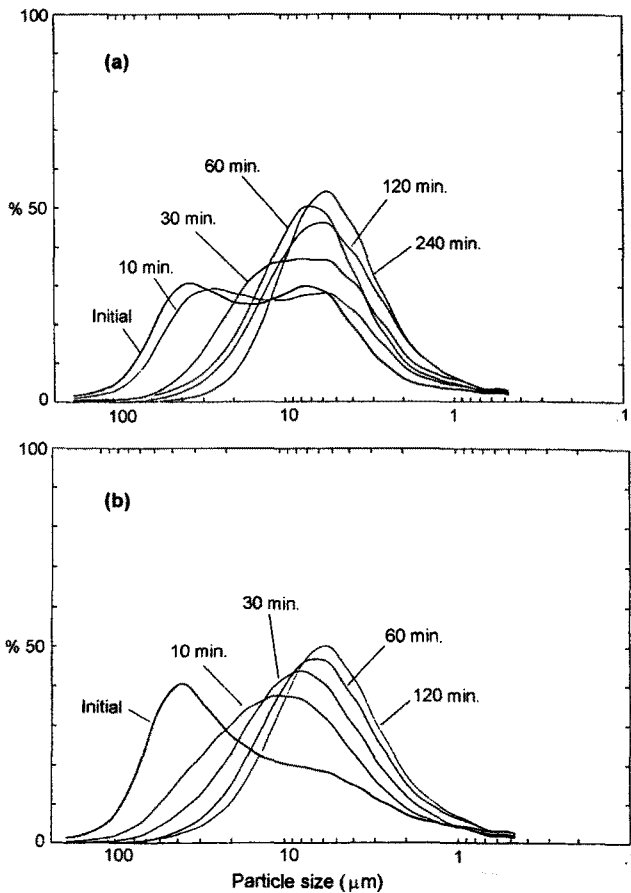


Fig. 9. Time variation of size distribution of suspension taken near the bottom of the tank under static condition with the different initial concentrations: (a) 500 mg/l; (b) 800 mg/l.

Table 3. Time variation of textural parameters of suspended sediments under static condition with the different initial concentrations of 500 and 800 mg/l

Time (min)	Init. Conc. (mg/l)	$D_{50}$ ( $\mu$ m)	Mean ( $\mu$ m)	Init. Conc. (mg/l)	$D_{50}$ ( $\mu$ m)	Mean ( $\mu$ m)
0		13.4	22.4		19.6	26.1
10		11.3	18.9		9.9	15.2
30	500	7.4	11.0	800	7.7	11.0
60		6.8	9.8		6.1	8.2
120		5.8	7.9		5.5	7.3
240		5.2	6.5			

Table 4. Time variation of textural parameters of suspended sediments under turbulent conditions with the initial concentration of 800 mg/l

Time (min)	Shear stress (dyne/cm <sup>2</sup> )	$D_{50}$ ( $\mu$ m)	Mean ( $\mu$ m)	Shear stress (dyne/cm <sup>2</sup> )	$D_{50}$ ( $\mu$ m)	Mean ( $\mu$ m)
0		19.6	26.1		19.6	26.1
0		10.2	16.2		9.6	14.8
30	0.3	9.4	13.0		7.8	11.8
60		8.1	11.8	1.0	7.6	9.9
120		8.0	11.7		7.1	8.8
240					6.8	8.4

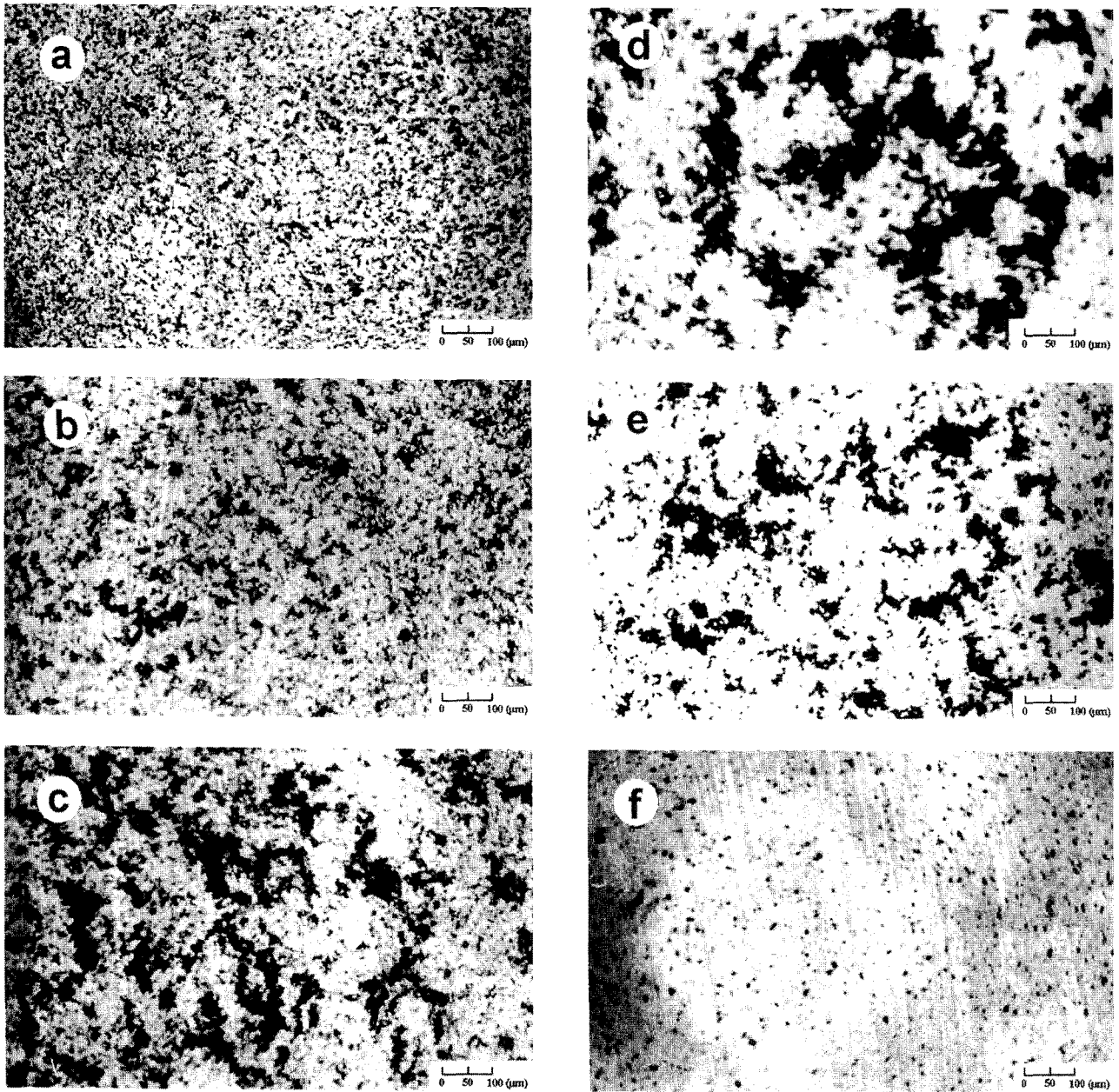


Fig. 10. Time series of microscopic picture of suspension, sampled at the lower part of the tank. The largest flocs are well developed after 20 to 30 minutes: (a) initial state; (b) after 5 minutes; (c) after 10 minutes; (d) after 20 minutes; (e) after 30 minutes; (f) after 90 minutes.

입도의 변화폭이 좁고 변화 시간이 지연되었다(Table 4). 저면 전단력이 1.0 dyne/cm<sup>2</sup>로 증가함에 따라 입도의 변화폭이 약간 더 커짐을 알 수 있다. 이는 높은 부유물질의 농도에서 간섭침전이 일어나게 하는 미약한 난류발생으로 형성되는 입자간의 그물망이 깨지면서 응집작용이 다시 증가하게 되고 침전이 가속화되는 원인에 기인하는 것으로 사료된다.

부동유체 조건으로 초기농도  $C_0$ 를 500 mg/l로 맞추고 실험 진행시키는 과정에서 부유물질 입자덩어리의 변화를 관찰한 결과, 시간의 경과에 따라 서로 다른 크기의 입자덩어리가 형성되었다가 침전됨을 보였다. 초기상태의 부유물질들은 23  $\mu\text{m}$ 의 평균입도로 거의 분산되어 있는 상태를 보이다가(Fig. 10a), 실험시작 후 5분의 시간이 경과하면서 서서히 입자간의 응집이 일어나기

시작하였다(Fig. 10b). 20분 경과시 입자의 응집작용이 가장 활발하게 일어나 최대 200  $\mu\text{m}$  이상으로 초기 입자의 평균크기보다 10배 정도 증가함을 보였다(Fig. 10d). 이렇게 커진 입자덩어리는 상대적으로 큰 중력의 영향을 받아 침전의 가속화가 일어나므로 인해 30분 경과시에는 상당량의 입자덩어리가 침전되고, 나머지 입자덩어리의 크기가 약 100  $\mu\text{m}$  정도로 줄어드는 양상을 보였다(Fig. 10e). 90분 경과시에는 부유물질의 농도가 낮아짐과 동시에 평균입도 역시 초기보다 오히려 감소하였다(Fig. 10f). 초기시료의 일부 조립한 입자들의 자체 침전에 의한 것으로 해석된다. 세립질 입자간의 응집작용은 부유되어 있는 입자들이 서로 접근하였을 때 각 입자의 점착성과 소성으로 이루어진다(Krone, 1962). 입자간의 충돌과 결합력은 입자덩어리의 형



**Table 5.** Time variation of relative percentages of clay minerals with time under static and turbulent conditions with the initial concentration of 800 mg/l

Time (min)	Shear stress (dyne/cm <sup>2</sup> )	Relative percentages of clay minerals (%)			
		Smeectite	Illite	Kaolinite	Chlorite
0	0.0	14.7	40.8	22.0	22.5
120		7.9	51.1	20.5	20.5
240		3.9	55.3	20.4	20.4
0	0.3	14.7	40.8	22.0	22.5
120		1.1	66.2	16.4	16.4
240		3.6	53.6	21.4	21.4

성에 있어 절대적이며, 이 두가지 요인은 완전히 독립적으로 작용한다. 입자간의 충돌은 브라운 운동, 차별침전 그리고 유체 응력에 의해 이루어지며, 입자간 결합력은 주로 부유물질을 구성하고 있는 점토광물의 표면전하력의 결과로서 형성된다.

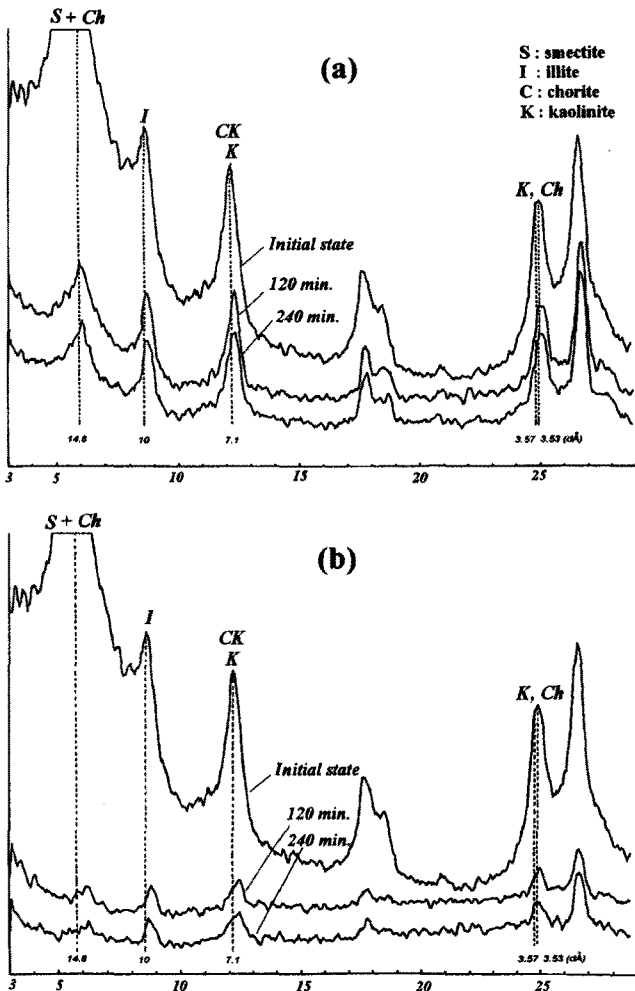
**부유물질내 점토광물의 상대함량 변화**

초기농도  $C_0$ 가 800 mg/l로 주어지고 부동 유체상태와 약한

난류의 발생으로 인한 저면 전단력을 0.3과 1.0 dyne/cm<sup>2</sup>로 발생시킨 조건에서, 실험 시작 후 120분과 240분 경과시 저층에서 채취된 부유물질에 대하여 점토광물을 상대적 함량변화를 분석하였다. 시간의 경과에 따라 침전이 진행될수록 수층에 남아있는 부유물질내 스멕타이트의 함량이 가장 현격한 감소를 보였으며 고령석과 녹니석은 약간씩 감소하고, 일라이트의 감소율이 가장 느리게 나타났다(Table 5, Fig. 11a). 특히 난류를 발생시켰을때는 스멕타이트의 감소가 부동 유체시보다 빠르게 일어났으며, X-선의 피크가 복잡해지고 반사면적이 다소 넓어지는 경향을 보였다(Fig. 11b). 이는 부유물질의 침전이 진행되는 동안 난류의 발생으로 인해 각 점토광물의 충돌기회가 훨씬 많아지고 이온 반응이 활발히 일어나 비정질과 복합체의 형성이 보다 많아진 것에 기인하는 것으로 사료된다. 미립의 점토광물은 물에 섞이어 부유상태로 되면 표면에 작용하는 결합력에 따라 분산되기도 하고 응집되기도 하여 입자 덩어리를 형성한다. 이때 분산과 응집의 상태를 지배하는 주된 힘은 판델바알스 인력과 반발력으로 작용하는 정전력이며, 이 두가지 힘의 균형에 의해 입자간의 움직이는 힘이 결정된다(Gibbs, 1977). 따라서 부유물질이 침전되는 동안 각 점토광물이 감소되는 변화에 있어 차이가 나는 것은 각 점토광물의 표면전하력에 의한 결합력의 차이에 있다고 볼 수 있다. 이와 같이 각각의 점토광물 변화는 실제 연안환경에서 Edzwald and O'Melia(1975) 그리고 Gibbs(1977) 등에 의해 보고된 강에서 바다쪽으로 향하면서 나타나는 해저면의 표층퇴적물내 점토광물의 수평변화를 가능케 해주는 사실이다.

**결론**

일정한 부유물질의 농도상태에서 염분도의 증가에 따라 저층에서 부유물질 농도는 대수함수적으로 감소하는 한편, 침전속도는 선형적인 증가를 보인다. 부유물질의 초기농도  $C_0$ 의 변화에 따른 응집작용 및 침전특성은 농도범위에 따라 3가지 경우로 해석되었다. 첫째, 200 mg/l 이하의 범위에서는 입자간의 상호간섭이 거의 일정하지 않아 농도변화에 따른 침전속도의 변화가 거의 일어나지 않으며, 둘째, 200~13,000 mg/l 범위에서는 부유상태의 입자간 상호간섭이 활발히 일어나 입자 덩어리가 잘 형성되며,  $W_{50}=0.45C_0^{0.44}$ 의 상호관계식에 따라 농도의 증가에 따라 침전속도가 가속화된다. 하지만, 13,000 mg/l 이상의 높은 농도 범위에서는 농도가 증가할수록 간섭침전으로 인해 침전속도는 오히려 감소한다. 난류의 세기가 세립질 부유물질의 침전과정에 미치는 영향은 부유물질의 농도에 따라 다르게 나타났다. 실험조건에서 상대적으로 부유물질의 농도가 낮아 (500 mg/l) 입자간의 상호간섭이 활발하지 않은 상태에서는 난류의 발생은 입자간의 충돌기회를 증가시켜 부유물질의 응집작용과 침전을 촉진시키는 한편, 높은 초기농도(800 mg/l)에서 난류의 발생은 오히려 부유물질의 침전을 지연시켰다. 따라서 부유물질의 침전시 정류상태에서 보다 더 빨리 침전을 일으키는 난류세기의 임계값이 존재하며, 이는 부유물질의 농도에 반비례한다. 부동유체 상태와 난류 발생 상태에서 모두 시간이 경과함에 따라 부유물질의 입도분포와 점토광물의 상대함량 변화가 일어나는데, 스멕타이트가 가장 빨리 침전되는 반면, 일라이트



**Fig. 11.** Time variation of X-ray diffractogram of suspension: (a) static condition; (b) turbulent condition.

가 가장 느린 침전속도를 보였다. 이는 부유물질 내 스멕타이트의 함량이 많을수록 입자간의 응집이 활발하여 침전이 빨리 진행될 가능성을 시사해 주고 있다.

결론적으로 하구나 연안환경에서 다변할 수 있는 부유물질의 농도, 난류의 세기, 염분도, 입도분포, 점도광물의 함량 등은 부유물질의 응집작용과 침전특성을 결정하는데 있어 독립적으로 작용하지 않고 서로 상관관계를 가지면서 영향을 미치고 있으며, 특히 부유물질의 농도와 난류의 세기 변화는 최대의 응집작용 및 침전속도를 유발하기 위한 상호간의 적정 조합수준이 존재하는 것으로 사료된다.

## 사 사

본 논문내용에 대하여 세심하게 심사를 해주신 편집위원장님을 비롯하여 익명의 심사위원님들에게 깊은 감사를 드립니다. 그리고 논문의 편집과 그림 제작에 많은 도움을 준 한국해양연구소 박은순 양에게 고마움을 전합니다.

## 참고문헌

- 강시환, 1984. 퇴적물 구성입도가 부상과 퇴적에 미치는 영향. 한국수문학회지, **17**: 191-196.
- 박광순, 이동영, 강시환, 1996. 미세퇴적물의 침강특성. 해양연구, **18**: 25-36.
- 추용식, 1993. 세립질 부유퇴적물의 침전특성에 관한 구조실험 연구. 서울대학교 석사학위논문, 128 pp.
- Burt, T.N., 1984. Field settling velocities of estuary muds. In: Estuarine cohesive sediment dynamics, edited by Mehta, A.J., *Lecture notes on coastal and estuarine studies*, **14**: 126-150 pp.
- Conomos, T.J. and Peterson, D.H., 1976. Suspended particle transport and circulation in San Francisco Bay: an overview, In: Estuarine Processes II, edited by Wiley, M., Academic Press, London, 82-97 pp.
- Dickson, S.C. and Long, R.R., 1983. Oscillating-grid turbulence including effects of rotation. *J. Fluid Mech.* **126**: 315-333.
- Edzward, J.K. and O'Melia, C.R., 1975. Clay distribution in recent estuarine sediments. *Clays clay minerals*, **23**: 39-44.
- Einstein, H.A. and Krone, R.B., 1962. Experiments to determine modes of cohesive sediment transport in salt water. *J. Geophy. Res.*, **67**: 1451-1464.
- Gibbs, R.J., 1977. Clay mineral segregation in the marine environment. *J. Sed. Petrol.*, **47**: 237-243.
- Hayter, E.J., 1983. Prediction of cohesive sediment transport in estuarial waters. Technical Report-070, Coastal and Oceanographic Engineering Dept., Univ. of Florida, Gainesville, 400 pp.
- Hayter, E.J., 1986. Estuarial sediment bed model. In: Estuarine cohesive sediment dynamics, edited by Mehta, A.J., *Lecture notes on coastal and estuarine studies*, **14**: 326-359 pp.
- Hopfinger, E.J. and Toly J.A., 1976. Spatially decaying turbulence and its relation to mixing across density interface. *J. Fluid Mech.* **78**: 155-175.
- Kranck, K., 1986. Settling behaviour of cohesive sediment. In: Estuarine cohesive sediment dynamics, edited by Mehta, A.J., *Lecture notes on coastal and estuarine studies*, **14**: 151-169 pp.
- Krone, R.B., 1962. Fulme studies of the transport of sediment in estuarial processes. Final Report, Hydraulic Engineering Laboratory and Sanitary Engineering Research Laboratory, Univ. of California, Berkeley, 110 pp.
- Krone, R.B., 1963. A study of rheological properties of estuarial sediments. Rep. 63-8, Hydraul. Eng. Lab and Sanitary Eng. Res. Lab. Univ. of California, Berkeley, 191 pp.
- Leussen, W.Van., 1988. Aggregation of particles, settling velocity of mud flocs: A review. In: Physical processes in estuaries, edited by Dronkers, J. and Leussen, W.Van, Springer-Verlag, Berlin, 347-403 pp.
- McCave, I.N., 1983. Paticulate size spectra, behavior, and origin of nepheloid layers over the Nova Scotian Continental Rise. *J. Geophy. Res.*, **88**: 7647-7666.
- Mehta, A.J., 1986. Characterization of cohesive sediment properties and transport processes in estuaries. In: Estuarine cohesive sediment dynamics, edited by Mehta, A.J., *Lecture notes on coastal and estuarine studies*, **14**: 290-325 pp.
- Migniot, C., 1968. A study of the physical properties of different very fine sediments and their behaviour under hydrodynamic action. *La Houille Blanche*, **7**: 591-620 (in French with English abstract).
- Nicolson, J. and O'connor, B.A., 1986. Cohesive sediment transport model. *J. of Hyd. Eng., ASCE*, **112**: 621-639.
- Owen, M.V., 1970. A detailed study of the settling velocities of an estuary mud. Report No. INT 78, Hydraulics Research Station, Wallingford, 25 pp.
- Owen, M.V., 1971. The effect of turbulence on the settling velocities of silt flocs. In: Proc. of Fourteenth Congress of I. A.H.R. Paris, **4**: 27-32 pp.
- Parchure, T.M. and Mehta, A.J., 1985. Erosion of soft cohesive sediment deposits. *J. of Hyd. Eng.*, **111**: 1308-1326.
- Partheniades, E., 1965. Erosion and deposition of cohesive soils. *J. of the Hydraulic Division, ASCE*, **91**: 105-139.
- Sheng, Y.P., 1983. Mathematical modeling of three-dimensional coastal currents and sediment dispersion: model development and application. Tech. Rep. CERC-83-2, U.S. Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station, CE, Vicksburg, MS, 288 pp.
- Thompson, S.M. and Turner, J.S., 1975. Mixing across an interface due to turbulence generated by an oscillating grid. *J. Fluid Mech.* **67**: 349-368.
- Thorn, M.F.C., 1981. Physical processes of siltation in tidal channels. In: Proc. Hydraulic modeling applied to maritime engineering problems, ICE, London, 47-55 pp.

1998년 7월 1일 원고 접수

1998년 12월 19일 수정본 채택