

## 점착성 퇴적물의 침전 특성 분석 Analysis of Characteristics of Cohesive Sediment Settling

김종우\* / 윤세의\*\* / 이종태\*\*

Kim, Jong-Woo / Yoon, Sei-Eui / Lee, Jong-Tae

### Abstract

The settling concentration of fine suspended solid particles(alumina( $Al_2O_3$ ) and quartz( $SiO_2$ )) is investigated with the physico-chemical effects(initial concentration, pH and  $NaCl$ ). Laboratory tests have confirmed the significant influence of increasing initial concentration and salinity which can lead to flocculation due to the intermolecular attraction. Furthermore, the influence of the pH value on the concentration-time curves of alumina has been on firmed. Besides a numerical model to predict the behaviour of cohesive deposit under still water is analyzed by solving the unsteady one-dimensional diffusion-advection equation with a explicit, implicit, Crank-Nicolson and finite difference scheme. The model predicts the existence of an equilibrium concentration. Application of the model with implicit centered difference to data from settling experiments shows a similar distribution.

**keywords** : cohesive deposit, suspension, settling concentration

### 요 지

미세하게 부유된 입자(alumina( $Al_2O_3$ ), quartz( $SiO_2$ ))의 침전 농도를 물리-화학적(초기농도, pH,  $NaCl$ )인 영향을 고려하면서 연구하였다. 침강실험은 입자사이의 끌어당기는 힘 때문에 Flocculation(플록 형성)이 일으키는 초기농도와  $NaCl$ 의 증가가 중요한 영향을 미치며, 더욱이 미립자(alumina( $Al_2O_3$ ))의 농도-시간 곡선에 pH의 영향이 매우 큼을 보였다. 또한 정지수면 조건하에서 미립자의 침전 거동예측을 위한 수치 모델은 부정류 1차원 이송방정식에 의해 분석되었으며 양해법, 음해법, Crank-Nicolson 기법 및 유한차분법을 이용하였다. 수치모델은 평형을 이룬 농도변화까지 예측하였으며, 실험치의 비교분석을 통해 중앙차분법을 통한 Implicit 모형의 계산이 대체로 일치하였다.

**핵심용어** : 점착성 퇴적물, 부유, 침전농도

### 1. 서 론

자연하천은 시간이 흐르면서 토사의 침식, 이송 현상이 발생하며, 부유사가 유속이 적은 하천, 항만, 호수, 수력발전을 위한 저수로 등에 퇴적된다. 또한 하천수로 내의 퇴적물은 하천의 홍수 단면을 감소시켜 홍수 범람의 규모를 더 크게 하며, 특히 오염된 부유사

의 이송과 침전은 하천 수질을 오염시켜 하천생태계를 파괴하는 결과를 초래하게 된다. 실제 독일 엘베강 Schnackenburg의 하천 구간에서 많은 오염된 침전물을 수거하였다(Nestmann와 Büchele, 2002).

하천에 이송하는 부유사는 크게 무기물질과 유기물질로 나눌 수 있다. 여기서 무기물질은 비 점착성 물질과 점착성 퇴적물로 나눈다. 점토는 대부분의 토양이

\* 정희원, Institute of Water Resources Management and Rural Engineering (IWK), The University of Karlsruhe, Germany (e-mail: kim@iwk.uka.de)

\*\* 정희원, 경기대학교 토목·환경공학부 교수, 공학박사 (e-mail: syoon@kyonggi.ac.kr)

갖는 무기성분이 주종을 이루며, 수분을 유지한다. 점토는 물 속에서 생물학적 폐기물, 유기 화학 물질, 기체 및 그 밖의 다른 오염 화학종의 반응과 운반에 중요한 역할을 한다. 일반적으로 물에 녹아 있는 점토광물의 입자표면은 음이온을 띄며, 이런 화학적인 성분 때문에 점착성 입자간에 응집현상이 일어난다(Mihopoulos, 1995). 응집현상은 입자 크기의 증가로 침강속도가 커져 농도변화에 큰 영향을 끼친다. 입자가 큰 비 점착성 물질의 침강속도는 Stokes 법칙으로 계산 할 수 있으나 점토질 미립자의 침강률은 하천에서 생물학적 특성, 유기 화학 물질 및 그 밖의 다른 오염 화학종에 따라 변화하므로 그 거동특성의 묘사는 상당히 복잡하다.

점토성 물질의 거동에 중요한 변수인 응집(flocculation)현상에 관한 실험적 연구가 Krank(1980)에 의해 흐름이 없는 하천에서 실시되었다. 작은 미세한 미립자는 물 속에서 응집 때문에 1,000  $\mu\text{m}$ 까지 커질 수 있다(Van Leussen, 1994). Krone(1962)은 직선 수로에서 흐름 속도의 변화를 통해 San Francisco Bay 퇴적물의 침전현상을 연구하였다. 그의 연구결과 하상 전단력  $\tau$ 가 한계전단력  $\tau_c$ 보다 클 때 침전 현상이 일어나지 않으며, 반대로 하상전단력이 한계전단력보다 작을 때 물에 녹아 있는 미립자는 침전한다. Partheniades (1965)는 점착성 퇴적물의 침식과 침전현상을 관찰하였다. 고농도 또는 저농도와 상관없이 두가지 형태의 농도 변화를 보여주었으며, 즉 농도 변화가 시간이 지나므로 작아지다가 평형농도(equilibrium concentration)를 이루는 것을 발견하였다. Partheniades와 Kennedy (1966)는 원형 인공수로에서 점착성 미립자의 농도가 평형(equilibrium)을 이룬 후 미립자의 평균직경은 0.9  $\mu\text{m}$ 에서 0.2  $\mu\text{m}$ 변화하는 것을 측정하였다. Lau와 Krishnappan(1992)은 침전하는 미립자의 농도변화와

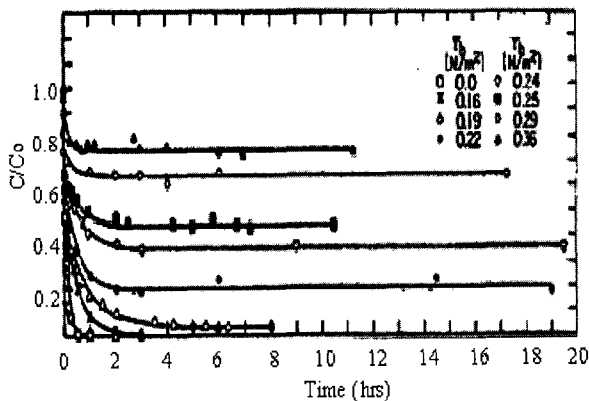


그림 1. 부유사(Kaolinite)의 침강 현상 (Methhta와 Partheniades, 1975)

미립자 크기 변화를 측정하였다.

점착성 미립자는 오염 이송원으로 널리 인식 되어왔다. 그러므로 점착성 미립자의 농도변화의 산정을 위한 수치모델은 오염 부유사의 변화 예측을 위해 필수적이다. 하천에서 미립자 이송예측에 관한 수치모델이 Lick(1982), Hayter(1987)와 Lau(1996)등에 의해 연구되었다. 대부분의 수치모델은 각각의 점착성 미립자의 크기는 다른 미립자로부터 독립한다는 가정하에 즉, 입자사이의 다른 이온성분으로 인한 Flocculation(플록 형성)을 고려하지 않았다.

본 연구는 침강 수주 측정 높이 21.5 cm에서 점착성 부유사의 시간-농도곡선에 대해 초기농도변화, pH 및 염분농도의 변화를 고려하여 연구하였다. 또한 시간-농도(time-concentration) 곡선 변화를 정지수면 조건하에서 1차원 이송방정식에 근거한 예측모델을 사용하여 계산한 값과 실험치와 비교분석 하였다. 이 수치모델은 양해법, 음해법, Crank-Nicolson기법을 통한 유한차분 근사법을 이용하였다.

## 2. 부유사의 침강현상

### 2.1 기본 이론

점토광물은 입자표면의 이온성분 때문에 하천에 녹아 있는 다른 이온들과 물리-화학적 작용으로 충돌(collision) 및 응집(flocculation)되어 흐름이 적은 하천 바닥 또는 항만에 침전된다. 침전 및 응고된 점착성 미립자는 하천에서 전단력의 증가로 파괴되어 침식되며, 하천바닥에서 현탁액으로 변한다. 대부분의 침강 실험은 시간 경과에 따라 부유한 점착성 미립자가 급하게 침강하다가 평형농도(equilibrium concentration)를 이루는 것을 보여준다. 한 예로 점착성 미립자(kaolinite) 침전 거동에 관해 Mehta와 Partheniades(1975)가 그림 1

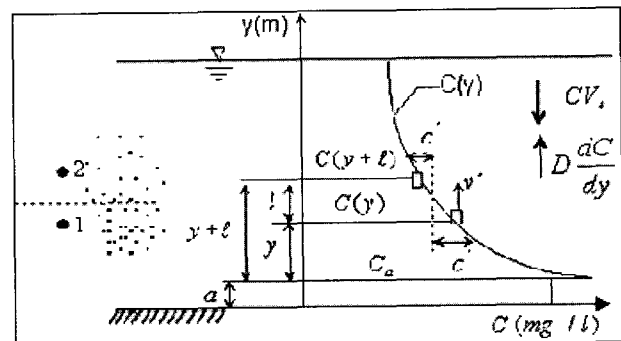


그림 2. 난류 확산으로 인한 작은 미립자의 이송현상

에서와 같이 시간-농도관계를 나타냈으며, 초기 농도  $C_0$  가 시간이 지나면서 작아지다가 평형을 이루는 것을 발견하였다. 점착성 미립(kaolinite)자의 침강률은 하상 전단력과 초기 농도에 영향을 받는다. 또한 하상전단력이 작을수록 부유사의 농도가 급속하게 감소하는 특징을 볼 수 있다. 정류흐름에서 작은 미립자의 농도변화를 수면에서 바닥면까지 그림 2에 나타내었다. 수위  $y$ 에서 농도분포  $C(y)$ 는 바닥면의 마찰력 때문에 감소된 흐름속도 분포로 하상층으로 갈수록 증가한다.

난류확산으로 인한 미립자의 연직 침강속도변동  $v'$ 와 농도변동  $c'$ 이 생긴다. 지점 1면에서의 농도증가는  $c + c'$ 와 속도감소는  $V - v'$ 로, 또한 지점 2면에서는 농도감소는  $C - c'$ 와 속도증가는  $V + v'$ 로 나타낼 수 있다. 그림 2에서 표현된 바와 같이 연직방향에서 미립자의 시간에 따른 농도변화률은 1차원 이송-확산 방정식으로부터 식(1)과 같이 나타내어진다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + V \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left( D \frac{\partial C}{\partial z} \right) \quad (1)$$

여기서  $C$ 는 시간 종속 농도이고,  $D$ 는 연직방향의 분자 분산계수,  $V$ 는 미립자의 연직 침강속도를 나타내며,  $z$ 는 시간변화에 따른 수심이다.

### 3. 수치해석

본 연구에서는 1차원 부정류 이송방정식(one-dimensional unsteady diffusion-advection equation)인 식(1)에 시간항에 대해서는 전방차분법과 공간에 대해서는 후방차분법, 중앙차분법을 통한 음해법, 양해법, Crank-Nicolson기법들을 적용하였다. 또한 각 기법에 의한 수치해와 실측치를 비교 분석하므로써 모형의 검증을 실시하였고, 정확도가 향상된 기법을 선택하였다.

#### 3.1 초기 조건 및 경계조건

시간  $t = 0$ 일 때, 전 수심에 미립자는 충분히 균일하게 섞여 있으며, 부유사 농도는 아래 식(2)같이 연직 거리와 상관없이 초기 농도  $C_0$ 값을 갖는다.

$$C = C_0, \quad 0 \leq z \leq h \quad (2)$$

식(3)은 수면( $z = 0$ )에서 경계조건을 나타낸 것이다. 침강하는 미립자가 수면( $z = 0$ )밖으로 넘쳐 흐르지 않으며, 확산항과 운송항이 같다.

$$V \cdot C = D \frac{\partial C}{\partial z} \quad (3)$$

바닥면( $z = h$ )에서 확산항은 0를 나타낸다.

$$D \frac{\partial C}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

미립자 확산의 영향을 판단하기 위해 무차원 형태 안에서 Peclet수를 아래 식(5)같이 정의한다.

$$P_e = \frac{hV}{D} \quad (5)$$

여기서  $V$  = 미립자의 침강속도,  $D$  = 난류확산계수,  $h$  = 측정 수위높이를 나타낸다.

## 4. 실험결과 및 비교분석

### 4.1 실험방법

일반적인 농도측정 장치의 센서(sensor)는 물속에서 미립자 거동에 영향을 주므로 본 실험에서는 측정높이 21.5 cm에서 CCD-Camera("CCD" = Charged Coupled Device)를 이용하여 미립자 침강에 영향없이 시간에 따른 농도 변화를 측정하였다(Kim, et al., 2002). 침강 실험은 높이 100 cm, 가로 14.1 cm, 세로 14.1 cm의 plexiglass로 제작된 실험기에서 실시하였다(그림 3). 농도는 실험기 안에 전 수심에 대해 거의 균일하도록 충분히 잘 섞은 후 초기 농도를 CCD-Camera로 측정하였다. 그림 3에서 보듯이 CCD-Camera("CCD" = Charged Coupled Device)와 일반 빛을 쏘는 장치(1000 W까지) 침강수주에 설치되었으며, 빛을 흡수한 미립자들은 CCD-Camera에 의해 서로 다른 선명도 정보와 영상 이미지 그림으로 보여준다(그림 4(a)). 또한 CCD-Camera에 의해 촬영된 그림 정보(회상도 값)를 10진법으로 전환시킨다.

이 형상을 매트릭스 그림으로 나타내며, 회상도의 크기는  $160 \times 120$  pixels(전체 수는 19200)이다. 그리고 디지털 카메라로 측정된 영상 이미지 그림은 256개의 선명도로 보여지며, 가장 어두운 경우 0값을, 가장 밝을 경우 256값을 뜻한다.

예를 들면 그림 4(b)는 일반 수도물안에서 침강현상을 CCD-Camera으로 촬영된 영상 이미지를 그림으로 나타낸 것이다. Quartz의 5,000 mg/l 초기 농도가 시간이 지나면서 그 선명도가 변화하며, 초기 시간  $t = 0$

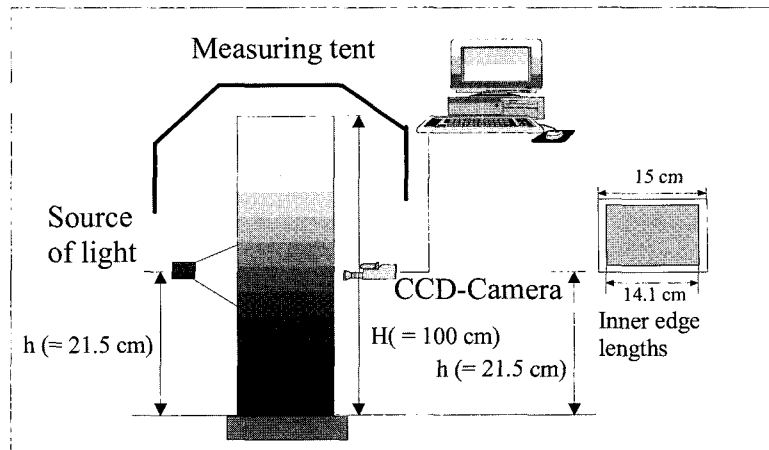


그림 3. 농도를 측정하기 위한 침강 수주 설계 단면도와 CCD-Camera

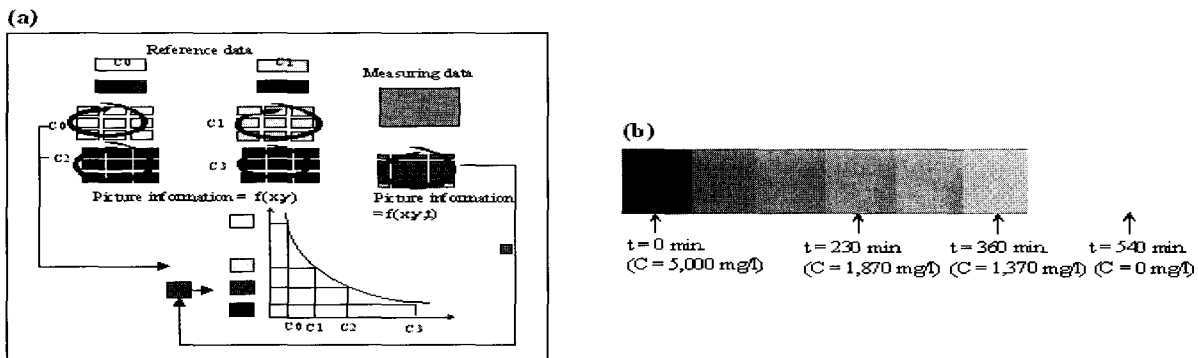


그림 4. CCD 카메라를 이용한 농도측정 방법 명시도(a)와 quartz의 침강 선명도(b)

일때 가장 어두운 영상 이미지 그림을 보여주고 있다. 즉 농도가 거의 물에 침전이 되지 않고 있다는 뜻이며, 측정시간  $t = 540$ 분 일 때는 가장 밝은 형상을 나타낸다. 이는 미립자가 거의 모두 침강이 되었다는 것을 말한다. 위에서 언급한 원리를 기초로 각각 선택된 실험 재료 종류에 따라 초기 농도값  $C_0, C_1, C_2, C_3$ 가 변화할 때 측정된 영상 이미지와 영상(picture)정보값으로 기준 곡선이 만들어진다(그림 4(a)).

실험값으로 측정된 함수를 이용하여 회상도에서 얻은 평균 디지털 데이터 값과 비교 분석을 통해 농도를 정한다. 초기 실험에서는 탁도의 영향 때문에 여러 빛의 강도가 필요하였으며, 점착성 미립자(alumina ( $Al_2O_3$ )) 경우 농도 범위  $0 \text{ mg/l}$ 에서  $20,000 \text{ mg/l}$ 까지 270 W, 320 W, 650 W, 1000 W가 필요하였다. 각각 alumina( $Al_2O_3$ ) 및 quartz( $SiO_2$ )의 초기 농도와 측정된 빛 강도의 크기에 의해 만들어진 농도값은 식(6)으로 표현할 수 있다.

$$N = N_0 e^{-k \cdot C} \quad (6)$$

여기서  $N$  은 측정된 빛의 출구 강도이다.  $N_0$  와  $k$ 는

각각 독립변수이며, 측정 농도 값을 결정하기 위해 계산된다. 그림 5에서 알 수 있듯이 quartz( $SiO_2$ )의 상수  $k$ 는 0.1036에서 2.427까지 측정되었으며, 미립자 alumina( $Al_2O_3$ )에서는 0.0597에서 3.153까지 변화한다. 두 미립자의 상관계수는 0.92에서 0.98까지 변화하였다. 초기 실험에서는 빛의 강도 값이 7,500이하에서 휘도의 크기의 변화가 작기 때문에 7,500에서 36,000사이에서 측정되었다. 여기서 최대 강도의 크기는 36,000, 최소값은 0이다(그림 5). 초기 실험 결과 값으로 CCD-Camera와 독일 Stuttgart 도시의 Endress+Hauser 회사에서 개발된 탁도센서(CUS 41)에 의해 실측한 값을 비교분석하였으며, alumina( $Al_2O_3$ )의 초기농도  $C_0$  1,000  $\text{mg/l}$ 와 20,000  $\text{mg/l}$ 가 부유물이 침전하는 과정에서 비슷한 농도변화 값을 나타내었다.

본 실험을 위해 하천에 많이 녹아 있는 점토광물 중에  $SiO_2$ 와  $Al_2O_3$ 를 선택하였다. 점착성 미립자 alumina( $Al_2O_3$ )의 평균직경은  $0.7 \mu\text{m}$ (pH 7)이며, quartz( $SiO_2$ )의 평균직경은  $3.5 \mu\text{m}$ 이다. 전자현미경으로 2,000 배 크기로 확대해서 볼 때 quartz( $\rho = 2.65 \text{ g/cm}^3$ )는 날카롭게 각이진 입자형태이며, alumina의 형태는 둥근 형태의 입자로 구성되었다.

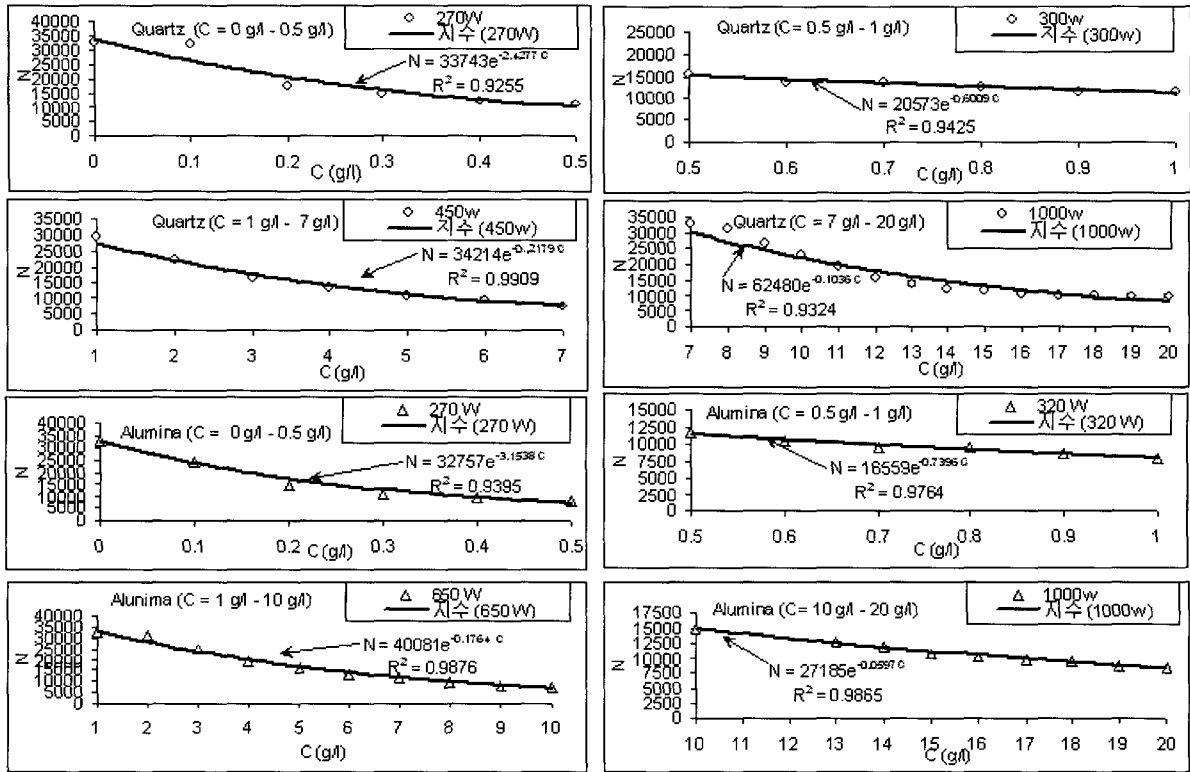


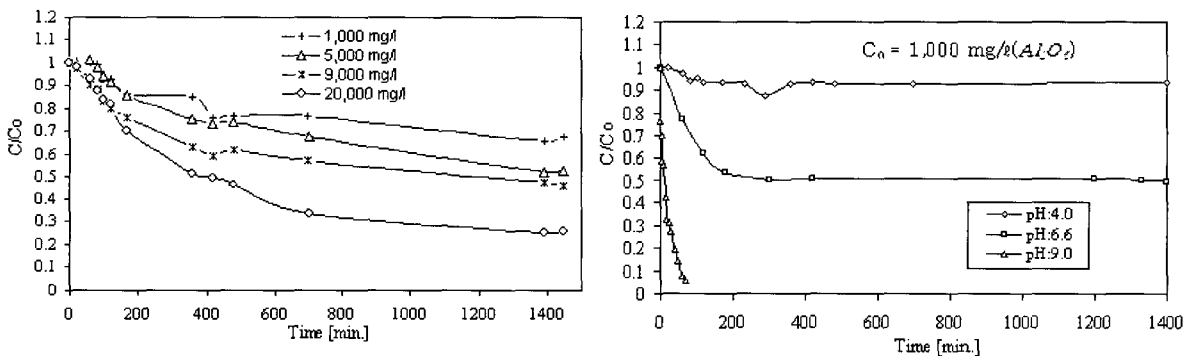
그림 5. CCD-Camera를 이용한 quartz 및 alumina의 농도와 지수함수

#### 4.2 실험 결과

본 실험결과에는 하천에 주로 녹아 있는 점착성 미립자 alumina( $Al_2O_3$ )와 quartz( $SiO_2$ )의 침전거동에 영향을 주는 농도변화를 보여주고 있다( $h = 21.5$  cm). 도시 수계에 따라 흐르는 물은 수많은 과정을 통해 필연적으로 염분을 얻는다. 또한 바닷물과 만나는 하천 및 항만에 염도의 변화를 보인다. 그리고 물이 토양사이를 흐르면서 부가적인 화학반응에 의해 pH가 증가하거나 감소할 수 있다. 그러므로 점착성 미립자들의 침강은 물리-화학적 인자의 영향에 민감하게 반응하므로 이 사실을

기초하여 실내 정지수면 조건하에 NaCl, pH, 미립자의 초기농도의 변화를 통한 점착성 미립자의 시간-농도곡선에 대한 실험을 하였다( $h = 21.5$  cm).

그림 6은 시간변화에 따른 물리-화학적 인자(초기 농도 변화, pH)의 농도변화를 나타내었다(측정위치  $h = 21.5$  cm). 그림 6(a)은 quartz( $SiO_2$ )의 초기 농도  $C_0$ 가 1,000 mg/l (19.2°C), 5,000 mg/l (18°C), 9,000 mg/l (16.2°C), 20,000 mg/l (19°C)까지 변화시켰을 때 농도변화를 시간에 따라 나타내었다. 그림 6(a)에서 알 수 있듯이 점점 초기 농도  $C_0$ 가 시간이 지나므로 침강률이 커지다가 침강시간 700분 이후 작아진다. 초기 농도의



(a) 미립자 quartz( $SiO_2$ ) 초기농도 증가에 따른 시간-농도 변화

(b) pH 영향아래 시간-농도 변화

그림 6. 물리-화학적 인자(농도 증가 및 pH)의 영향아래 시간-농도( $h = 21.5$  cm) 관계곡선

증가에 따라 미립자와 미립자 사이의 거리가 짧아져 응집(flocculation)현상이 일어나며 그 크기가 더 커진 미립자 덩어리 때문에 초기 농도가 큰 값이( $C_0 = 20,000 \text{ mg}/\ell$ ) 가장 침강률이 커지는 것을 나타내었다. 즉 부유사(quartz)의 온도가  $16^\circ\text{C}$ 에서  $20^\circ\text{C}$ 사이일 경우 초기 농도값 증가로 미립자의 침강에 큰 영향을 주고 있다. 그림 6(b)에서 더욱이 미립자의 침강현상에 pH의 영향이 매우 큼을 나타내었다. pH 4.0에서 점착성 미립자(alumina( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ))는 매우 천천히 침강하며, 반대로 pH 9.0에서는 미립자는 응집(flocculation)현상 때문에 매우 빨리 농도가 감소하다. pH 6.6에서는 급하게 부유사 농도가 200분까지 감소하다가 농도 평형을 이루는 것을 보여주었다.

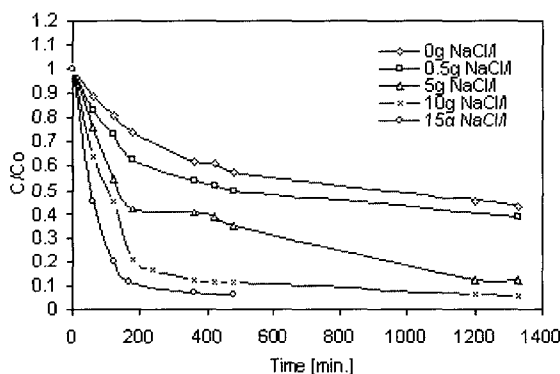
그림 7은 미립자(quartz( $\text{SiO}_2$ ), alumina( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ))의 초기 농도가  $7,000 \text{ mg}/\ell$ 인 경우  $\text{NaCl}$ 의 첨가로 농도 변화를 보여준다. 소량의  $0.5\text{g NaCl}/\ell$  첨가한 미립자에서는 초기 측정 시간에 급히 농도값이 감소하다가 평형 농도상태를 이루는 것을 관찰하였으며,  $\text{NaCl}$ 의 증가로 미립자의 침강률이 커지는 것을 나타내었다. Alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )의 경우 첨가  $5\text{g NaCl}/\ell$ 부터 모든 퇴적물 입자들이 측정시간 300분 안에 가라 앉는 것을 보였다(그림 7(b)).

림 7(b)).

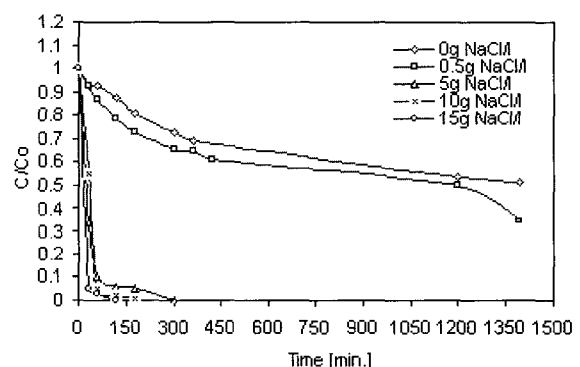
### 4.3 실험치와 비교분석

수치해석 기법의 장단점을 분석하기 위해 실험치와 비교 분석하였다. 표 1은 후방차분법과 중앙차분법의 계산치를 나타내고 있다. 실험치 초기농도 값은  $C_0 = 5,000 \text{ mg}/\ell$ ,  $D = 0.00015 \text{ m}^2/\text{s}$ ,  $\Delta z = 0.005 \text{ m}$ ,  $\Delta t = 0.05 \text{ sec}$ ,  $h = 21.5 \text{ cm}$ 로 한 경우 Implicit기법을 이용하여 계산한 값과 비교하였다.

여기서 퇴적물의 물리-화학적 특성 때문에 미립자의 연직 침강속도를 직접 측정하기가 어려움이 있어 수치해석을 위해 농도 50%에 해당하는 지점의 속도  $V_{s,50\%} = 0.00072 \text{ m/s}$ 를 대신하였다. 표 1에서 알 수 있듯이 큰 차이점은 없지만 시간이 지나므로 중앙차분법이 실험치 값과 가까워지는 것을 볼 수 있었다. 그림 8(a)는 초기 농도  $C_0 = 7,000 \text{ mg}/\ell$ ,  $D = 0.000055 \text{ m}^2/\text{s}$ ,  $\Delta z = 0.005 \text{ m}$ ,  $\Delta t = 0.05 \text{ sec}$ ,  $h = 21.5 \text{ cm}$ ,  $V_{s,50\%} = 0.00003 \text{ m/s}$ 로 한 경우, Implicit기법, Explicit기법, Crank-Nicolson기법을 이용하여 계산한 결과를 표시한 것이다. 실험에 사용된 재료는 하천에 녹아 있는 점착성 미립자 alumina( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )이며 농도 50%에 해당하



(a)  $C_0 = 7,000 \text{ mg}/\ell$  (quartz)



(b)  $C_0 = 7,000 \text{ mg}/\ell$  (alumina)

그림 7. 초기농도  $7,000 \text{ mg}/\ell$ 에  $\text{NaCl}$  변화에 따른 시간-농도( $h = 21.5 \text{ cm}$ )

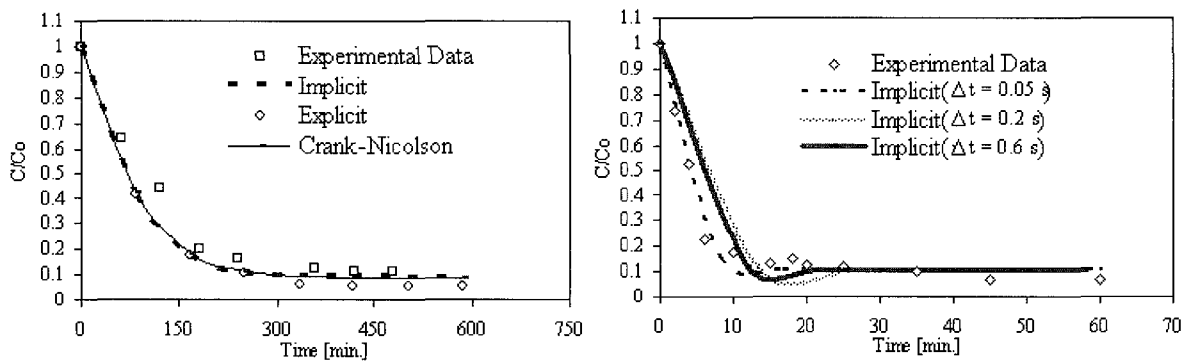
표 1. 후방차분법과 중앙차분법으로 계산값과 측정값의 비교

Settling Time [s]	Measured Concentration $C/C_0$	Measured Concentration $C/C_0$	
		Centered difference	backward difference
0	1	1	1
500	0.178	0.154	0.156
1500	0.120	0.108	0.112
2100	0.098	0.107	0.112
2700	0.072	0.107	0.112
3600	0.067	0.107	0.112

는 평균 지름은  $d_{50} = 0.7 \mu\text{m}$ (pH 7) 이다. 그림 8(a)에서 나타난 것처럼 적용된 기법들은 실측치와 거의 비슷한 결과를 보이고 있지만, 특히 Implicit기법과 Crank-Nicolson기법에 의한 수치해의 정확도가 향상된 결과를 나타냈다. 그러므로 본 연구에서는 수치해를 위해 Implicit기법을 선택하였다. Implicit기법은 시간변수에 독립되어 있으며, 큰 시간 간격에서 안정적이다. 그림 8(b)는 선택한 중앙차분법을 통한 Implicit 기법하에서 시간간격  $\Delta t$ 의 변화에 따른 농도-시간 관계곡선을 계산한 결과를 표시한 것이다. 수치해를 위해 미립자 alumina( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )의 초기 농도  $C_0 = 5,000 \text{ mg}/\ell$ ,  $D = 0.00015 \text{ m}^2/\text{s}$ ,  $\Delta z = 0.005 \text{ m}$ ,  $\Delta t = 0.05 \text{ sec}$ ,  $h = 21.5 \text{ cm}$ ,  $V_{s,50\%} = 0.00072 \text{ m/s}$  사용하여 계산하였다. 시간 간격이  $\Delta t > 0.2$  경우에 있어서 큰 수치분산을 나타내며, 값이 작을 때 수치분산의 양이 감소함을 알 수 있다. 여기서 시간간격이 0.05초인 경우 실측치와 비슷한 결과를 보이고 있다.

그림 9에 물리-화학적(미립자의 농도, pH,  $\text{NaCl}$ )인 영향아래 Implicit기법을 통해 계산했으며, 실측치 값과 비교 분석 하였다. 실험 전체의 부유물의 온도는  $18 \text{ }^\circ\text{C}$ 로부터  $22.7 \text{ }^\circ\text{C}$ 까지 변화하였다. 점착성 미립자(quartz)의 농도 50 %에 해당하는 평균 지름은  $d_{50} = 3.5 \mu\text{m}$  이다.

표 2에서는 실험조건들을 잘 나타냈으며, 수치계산을 위해  $\Delta z = 0.005 \text{ m}$ ,  $\Delta t = 0.05 \text{ sec}$  값들을 사용하였다. 실험 1과 2는 미립자의 농도의 영향을 고려하여 실측자료와 수치해를 비교 분석하였다. 실측자료를 통해 알 수 있듯이 부유사 농도( $C_0 \leq 20,000 \text{ mg}/\ell$ )의 증가와 더불어 입자간의 충돌률이 증가하게 되어 입자간의 간격이 좁아져 응집현상이 일어나 입자의 지름이 커져 침강속도가 증가 하게 된다. 실험 3과 4는  $\text{NaCl}$ 의 영향 때문에 시간이 지나므로 염분량이  $10 \text{ g}/\ell$ (quartz)일 때 침강속도가 빠른 것을 볼 수 있다.



(a) Implicit, Explicit기법과 Crank-Nicolson 기법에 의한 수치해와 실측치 비교

(b) 시간변화에 따른 Implicit 기법의 수치해와 실측값 비교

그림 8. 시간-농도 곡선 비교

표 2. 침강 실험 조건

Test No.	Material	$C_0(\text{mg}/\ell)$	$h(\text{cm})$	$V_{s,50\%}(\text{m})$	$\text{NaCl}(\text{g}/\ell)$	Temperature ( $^\circ\text{C}$ )
1	Distilled water & Quartz	3,000	21.5	0.0048	0	22.7
2	Distilled water & Quartz	20,000	21.5	0.008	0	19
3	Distilled water & Quartz	7,000	21.5	0.0039	0	20.2
4	Distilled water & Quartz	7,000	21.5	0.03	10	20.2
5	Distilled water & $\text{Al}_2\text{O}_3$	1,000	21.5	0.002 (pH 6.6)	0	20
6	Distilled water & $\text{Al}_2\text{O}_3$	1,000	21.5	0.23 (pH 9.0)	0	18

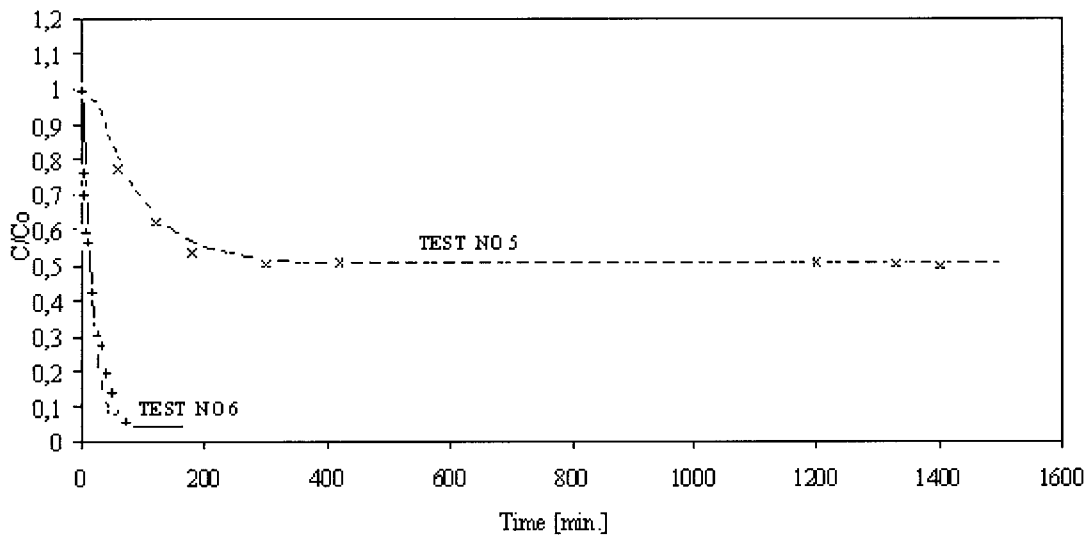
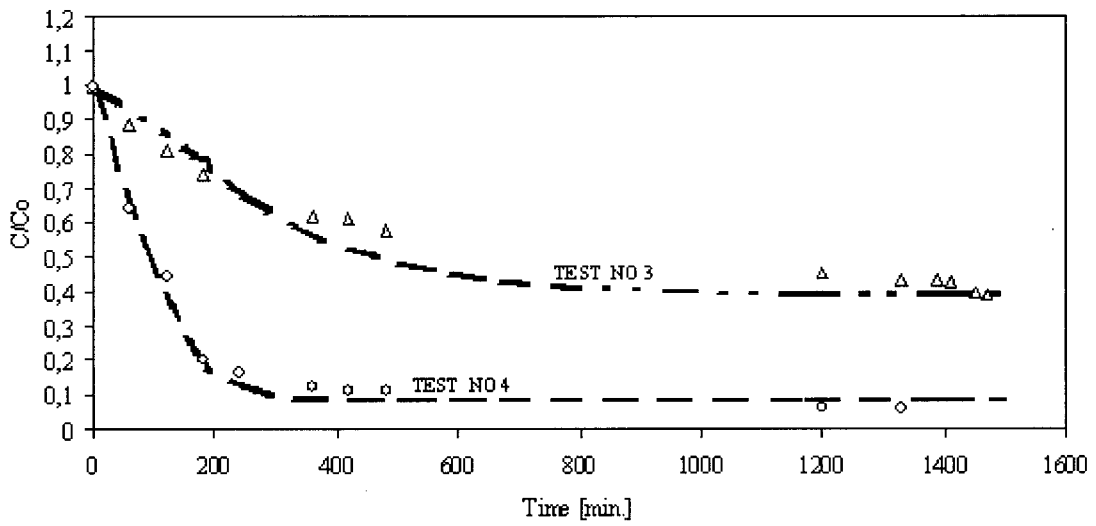
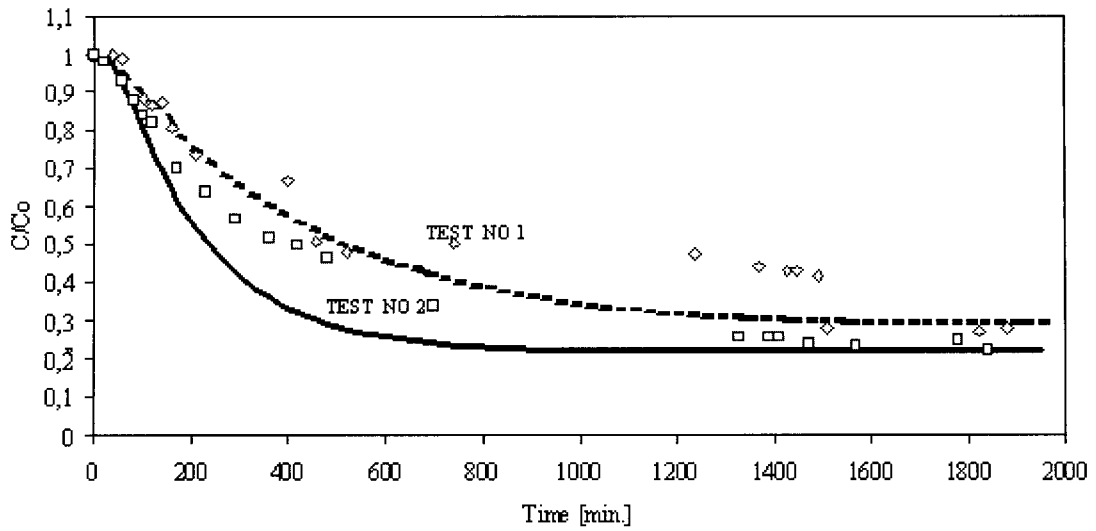


그림 9. 시간-농도곡선에 대한 실측치( $\Delta$   $\square$   $\diamond$   $\circ$   $\times$   $+$ )값과 점선 곡선으로 나타낸 수치해값 비교



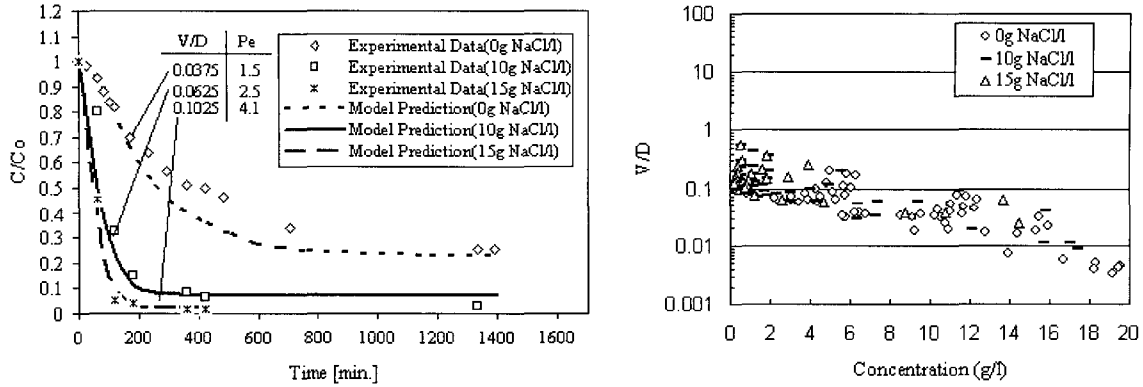


그림 10. 초기 농도  $C_0$  20,000 mg/l (quartz)에서 NaCl 영향 아래 시간-농도곡선(a)과 V/D 측정 값(b)

대부분 점토광물질들은 입자 표면에 음의 전하를 띠고 있다. 또한 양으로 하전된 반대 전하의 이온에 둘러싸여 전기적 이중층을 형성하여, 입자 상호 간에는 반발력이 있다. 그러므로 염의 첨가로 입자들 사이에 화학적인 작용에 의해 입자 덩어리들이 형성되어 침강 속도가 증가하게 된다. 실험 5와 6은 pH의 영향을 고려하여 수치해를 계산하였다. 여기서 pH = 6.6,  $C_0 = 1$  g/l (alumina)일 때 평균지름 값이  $0.15 \mu\text{m}$  이며 pH = 9.0 일 때  $d_{50} = 13.5 \mu\text{m}$  로 증가하였음을 측정하였다. 초기 농도가 20,000 mg/l (quartz), 염분 10 g/l 를 첨가된  $C_0 = 7,000$  mg/l (quartz) 및 pH = 9.0 (alumina) 일 때 침강속도가 빠른 것을 볼 수 있으며, 그림 9에서 나타난 것처럼 Implicit 기법은 모든 경우에 있어서 실측치와 거의 비슷한 결과를 보여주고 있다.

그림 10은 NaCl의 영향아래 시간-농도 곡선을 Implicit 기법으로 계산한 결과를 도시한 것이다. 초기 농도  $C_0 = 20,000$  mg/l (quartz)일 때  $\Delta z = 0.005$  m,  $h = 21.5$  cm,  $\Delta t = 0.05$  sec 경우 염분 증가량에 따라 시간-농도 곡선이 급하게 하강한다(그림 10(a)).

특히 NaCl의 농도 15 g/l 에서 침강시간은 400분 이내 인 것을 알 수 있으며, 침강속도가 증가하게 된다. 그림 10(a)에서 나타난 것처럼 Implicit 기법은 Peclet 수 값에 크게 영향을 받으며, NaCl의 농도 0 g/l 에서 Peclet 수는 1.5이며 NaCl의 농도 15 g/l 에서 Peclet 수는 4.1로 증가하였다. Peclet 수 값이 크면 클수록 시간-농도곡선의 기울기가 커진다. 계산된 V/D 변수값은 측정된 변수값  $0.003 < V/D < 0.6$  안에 있다(그림 10(b)).

### 5. 결 론

본 실험은 침강수주 높이 21.5 cm에서 실시하였으며, 도출된 결과는 측정된 점착성 침전물의 시간-농도곡선

(time-concentration curves)은 물리-화학적 인자들 (NaCl, pH, 미립자의 농도)에 따라 크게 변할 수 있다는 것이다. 즉 NaCl의 첨가로 미립자가 플록형성을 일으켜 입자의 크기의 증가로 시간-농도곡선(time-concentration curves)이 급히 감소하는 것을 관측하였다. 더욱이 점착성 미립자(alumina( $Al_2O_3$ ))의 침강현상에 pH의 영향이 매우 큼을 보였다. pH 6.6에서는 급하게 시간-농도곡선이 감소하다가 농도 평형을 이루는 것을 보여주었다. pH 4.0에서 점착성 부유사(alumina( $Al_2O_3$ ))의 침강이 거의 일어나지 않는 것을 보였다. 반대로 pH 9.0에서는 미립자는 플록형성 때문에 매우 시간-농도곡선(time-concentration curves)변화가 빠르다. 또한 부유사(quartz( $SiO_2$ ))의 온도가 20°C 아래일 경우 초기 농도값 증가로 미립자의 시간-농도변화에 큰 영향을 주고 있다. 또한 물리-화학적 특성(NaCl, pH, 미립자의 농도)에 따라 측정된 실측치와 수치해석 기법으로 계산한 값을 비교 분석하였다. 농도계산을 위해 시간항에 대해서는 전방차분법과 공간에 대해서는 중앙차분법을 통한 음해법, 양해법, Crank-Nicolson 기법들을 적용하였다. 특히 Implicit 기법과 Crank-Nicolson 기법에 의한 수치해의 정확도가 비교적 양호한 결과를 나타냈다. 본 연구는 시간에 따른 농도변화를 예측하기 위해 Implicit 기법을 선택하였다. 수치해를 위해 선택한 시간 간격  $\Delta t = 0.05$  sec와 수심 간격  $\Delta z = 0.005$  m 경우 수치분산이 작았으며, 실측치와 거의 비슷한 결과를 보였다. 연직 침강속도는 V와 확산계수 D는 물리-화학적 특성 때문에 직접 측정하기가 어려움이 있으며, 침강속도 V는 수치해석을 위해 농도 50%에 해당하는 지점의 속도  $V_{s,50\%}$  를 대신하였다.

본 실험에서 알 수 있듯이 물리-화학적인 특성(응집(flocculation) 현상, 전단력, 농도, pH, 온도 등)이 점착성 미립자의 침전에 매우 큰 영향을 끼치므로, 정지수

면 조건하에서 뿐 아니라 유동중인 흐름에서 이를 고려한 지속적인 연구가 요구된다.

### 참 고 문 헌

- Hayter, E.J. (1987). *Finite element hydrodynamic and cohesive sediment transport modelling system*. Report, Department of Civil Engineering, Clemson University, Clemson, SC.
- Krank, K. (1980). "Experiments on the significance of flocculation in the settling of fine grained sediment in still water." *Canadian Journal of Earth Sciences*, 17(11): 1517-1526.
- 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.
- Lau, Y.L. (1996). "Modelling cohesive sediment settling." *Arch Hydrobiol. Spec. Issues Advanc. Limnol.* 47, p. 363-371, Suspended Particulate Matter in Rivers and Estuaries.
- Lau, Y.L., and Krishnappan, B.G. (1992). "Changes in settling velocity and size distribution of cohesive sediment during settling." *J. Hydr. Res.* 30 (5): 673-684.
- Lick, W. (1982). "Entrainment, deposition and transport of fine-grained sediments in lakes." - *Hydrobiologia* 91: 31-40.
- Mehta, A.J., and Partheniades, E. (1975). "An Investigation of the Depositional properties of flocculated Fine Sediments." *Journal of Hydraulic Research*, 13(4): 361-381.
- Partheniades, E. (1965). "Erosion and Deposition of Cohesive Soils." *J. Hydr. Div., Proc. ASCE*, Vol. 91, No. HY1, Proc. Paper 4204, January.
- Partheniades, E., and Kennedy, J.F. (1966). "Depositional Behaviour of Fine Sediment in a Turbulent Fluid Motion." *Pro. 10th Conference on Coastal Engineering*, Tokyo, Vol II, pp. 708-724.
- Van Leussen, W. (1994). *Estuarine Macroflocs and their Role in Fine-grained Sediment Transport*. Ph.D. Thesis, University Utrecht.
- Kim, J. W., Nguyen, V. T., and Nestmann, F. (2002). *Mobilisierung und Immobilisierung von Peloiden an Gewässersohlen*. Arbeitsbericht des DFG Projektes.
- Mihopoulos, J. (1995). *Wechselwirkung Flockenbildung Flockenabtrennung unter Berücksichtigung der Durchströmungsmuster in Sedimentations- und Flotationsbecken*. Dissertation, Institut für Siedlungs Wasserwirtschaft, Universität Karlsruhe, Heft 72.
- Nestmann, F., und Büchele, B. (2002). *Morphodynamik der Elbe*. Schlussbericht des BMBF-Verbundprojektes mit Einzelbeiträgen der Partner und Anlagen-CD Karlsruhe: Inst. f. Wasserwirtschaft u. Kulturtechnik, Univ. Karlsruhe.

(논문번호:04-99/접수:2004.10.26/심사완료:2005.01.20)