

## 광물성 미립자의 침전거동에 관한 실험

## Experiment on Settling Behaviour of Fine Mineral Particles

김 종 우\*

Kim, Jong Woo

## Abstract

Experiments on settling behaviour of fine-grained particles without destroying the large fragile aggregates were carried out in still water with a CCD (Charged Coupled Device)-Camera. The experiments dealt with the measuring of the vertical concentration profile of cohesive particles with a CCD-Camera and the physico-chemical influences (*NaCl*, density, temperature and pH value) on the vertical distribution of the concentration. The vertical concentration profile of fine suspended particles (alumina and quartz) was possible up to 20,000 mg/ℓ with a CCD-Camera. The vertical concentration profile of cohesive sediments was on the decrease because of the increasing initial concentration, temperature and salinity. The vertical concentration profile of alumina was on the decrease quicker than quartz with increasing salinity. Furthermore, the pH value affects the settling behaviour of alumina. At a pH value of 4.2 the settling rate of the particles was very low and on the increase until pH 8.9 because of the aggregation behaviour of particles. From the pH value of 9 the average settling velocity was on the decrease.

**key words** : fine suspended particles, vertical concentration profile, settling velocity

## 요 지

부서지기 쉬운 큰 응집입자의 파괴 없이 미립자의 침강거동에 관한 실험을 정지수면 조건하에서 CCD(Charged Coupled Device) 카메라로 실시하였다. CCD 카메라를 통한 실험은 점착성 미립자의 연직분포의 농도와 농도의 연직분포에 대해 물리-화학적 인자(*NaCl*, 밀도, 온도 및 pH)의 영향을 조사하는 것이다. 부유된 미립자(alumina와 quartz) 농도의 연직분포는 20,000 mg/ℓ 까지 CCD 카메라로 측정할 수 있었다. 점착성 퇴적물의 농도의 연직분포는 초기농도의 증가, 온도의 증가 및 염분의 증가로 커진다. 그리고 염분의 첨가로 미립자(alumina) 농도의 연직분포가 quartz보다도 더 빠르게 감소한다. 그와 더불어서 pH은 미립자(alumina) 침강거동에 영향을 끼친다. pH 4.2에서 미립자의 침강률은 낮고, pH 8.9에서 입자의 응집현상 때문에 미립자의 침강률은 크다. pH 9부터 침강 평균속도는 감소한다.

**핵심용어** : 미세한 부유입자, 농도의 연직분포, 침전속도

## 1. 서 론

강물의 흐름은 강 기슭을 갈아내면서 토사를 침식시키는데 중요한 역할을 한다. 하천, 댐 주위, 호수, 항만, 저수지 그리고 하구에 매년 수 억톤의 토사들이 강물에 의해 운반 및 퇴적된다. 하천에 쌓인 토사는 통수단면적을 줄여 통수능을 저하시키며, 홍수 범람의 규모에 영향을 준다. 유사(fluvial sediment)는 수력기계의 날

개와 축을 쉽게 마모 또는 부식시켜 수명을 단축시킨다. 또한 저수지에 쌓인 토사는 저수용량의 감소를 가져오며, 도시화와 산업화에 따른 노출된 토양이 우수시 유출로 하수구 및 우수구에 퇴적된다. 특히 전기화학작용으로 점착성 퇴적물(cohesive sediment)은 오염된 물질들과 상호 작용을 통해 수질 오염을 야기 시키며, 생태계 파괴에 치명적인 작용을 한다. 실제 지난 2002년 태풍 '루사'와 2003년 태풍 '매미' 때문에 92년 완공

\* 정희원 · 한국건설기술연구원 수자원연구부 (e-mail : jw-kim@kict.re.kr)

된 다목적 댐인 임하댐물이 3년째 흙탕물로 변환되어 부유된 미립자가 침전되지 않고 있다. 또한 탁수로 인한 수질 변화는 하천에 서식하는 무척추동물 등 수중 생태계에 영향을 미칠 수 있다. 그러므로 이런 오염원인인 탁수의 원인과 대책마련을 위한 실험연구가 시급하다. 하천에 부유한 상태로 운반되는 광물성 미립자들은 대부분의 토양이 갖는 무기 성분의 주종이며, 입자 표면에 음전하를 띠고 있기 때문에 하천에 녹아 있는 인, 질소, 박테리아 또는 다른 유기물과 매우 강한 상호 작용을 일으킨다. 물이 콜로이드 점착성 미립자의 표면에 흡수되므로 점착성 미립자의 물리-화학적 성질이 급격히 변한다. 또한 물에 녹아 있는 다른 이온성분과 난류 흐름 안에서 충돌(collision) 및 응집(flocculation)현상을 일으켜 다른 형태의 미립자 침강속도를 갖게 된다(Van Leussen, 1994). 그러므로 점착성 퇴적물의 침강 현상의 분석은 상당히 복잡하며, 물리-화학적 인자들(유기물의 함량, 광물질 구성, 퇴적물의 입경, pH, NaCl의 첨가, 온도)의 영향 아래 그의 민감도에 대한 이해가 요구된다.

난류흐름에서 부유한 상태로 운반되는 점착성 퇴적물의 침강에 대해 Partheniades와 Kennedy(1966)가 연구하였다. Mehta와 Partheniades(1975)는 플록현상을 일으키는 미립자의 침강현상을 원반수로에서 연구하였으며, Krone(1962)는 직선 수로에서 San Francisco Bay 퇴적물의 침전현상을 실험하였다. 점착성 미립자의 침강실험에 공통된 연구결과는 하상 전단력  $\tau_a$  한계점 아래 있을 때 미립자의 침전현상이 일어나며, 하상전단력이 한계전단력  $\tau_c$  보다 클 때 침전 현상이 일어나지 않는다. 초기 농도가 시간이 지나므로 작아지다가 평형(equilibrium concentration)을 이룬다. 그러나 미립자 거동에 영향을 끼치는 광물질의 구성성분 및

다른 전기화학적 인자들에 대한 민감도 실험이 미흡한 실정이다. 그리고 점착성 미립자의 농도를 수중에서 기존의 센서로 측정하는 것은 매우 어려움이 있다. 왜냐하면 부유된 미립자가 센서의 영향에 민감하게 반응하기 때문이다.

그러므로 본 연구는 부유사속에서 농도측정 센서가 점착성 미립자의 농도에 영향을 크게 미치지로 실험장치 밖에서 점착성 미립자의 농도를 측정할 수 있는 CCD 디지털 카메라를 사용하였다. 미립자의 구성성분의 영향을 고려하여 하천에 퇴적된 점토광물의 구성물 주요군중에 가장 많은 alumina와 quartz를 실험체료로 선택하였다. 또한 미립자의 초기 농도변화, 온도, pH, NaCl 등과 같은 퇴적물의 물리-화학적 영향을 고려하여 CCD-Camera로 침강수주 연직분포의 7지점에서 농도변화를 관측하였다.

## 2. 부유사의 침강 실험

### 2.1 농도 측정을 위한 실험장치 및 방법

미립자의 농도를 비디오 카메라로 측정할 수 있으며(Haenscheidt, 1987), 이 방법은 쉽게 미립자의 침강 실험에 단순화 및 자동화할 수 있다. 농도 측정방법은 광 센서의 빛의 밝기를 디지털 카메라로 받아 디지털 영상의 휘도(brightness)의 크기에 따라 미립자 농도 값을 결정할 수 있다(Daniels와 Bodarwe, 1995). 미립자의 농도를 측정하기 위해 사용된 CCD-Camera는 그림 1(a)과 같이 침강수주에 설치하였다. 일반적으로 부유사속에서 측정하는 센서는 미립자 거동에 영향을 준다(Kim, 2004). 침강 수주는 높이 1,000 mm, 가로 150 mm, 세로 150 mm인 plexiglass로(안쪽 길이는 141 mm) 제작되었다(그림 1 (a)).

침강수주 안에서 실험 전 초기 농도는 전 수심에 대

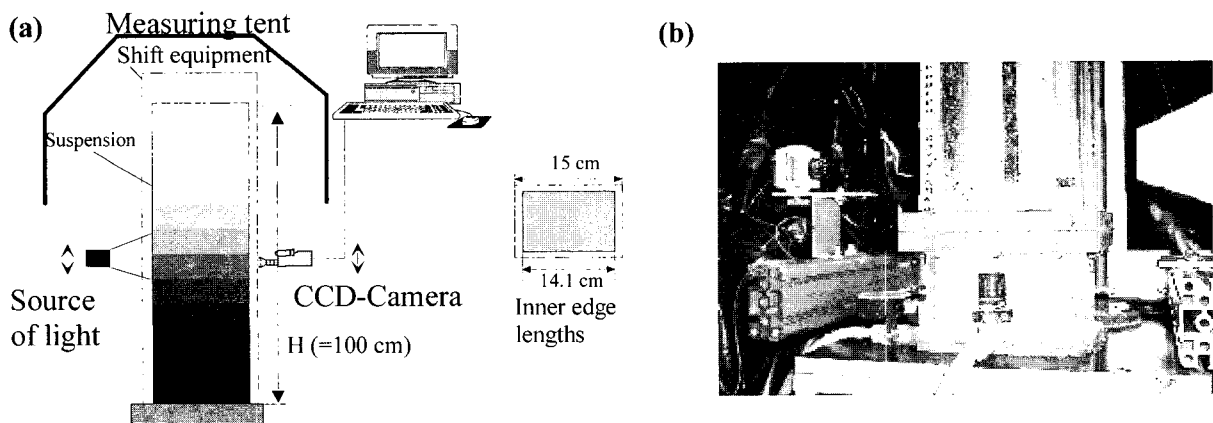


그림 1. 침강수주 설계 단면도(a)와 농도를 측정하기 위해 설치된 CCD-Camera(b)

해 거의 균일하도록 충분히 잘 섞은 후 높이와 시간에 따른 농도변화를 CCD-Camera로 측정하였다(그림 1(b)). 그림 1에서 보듯이 CCD-Camera와 일반 빛을 쏘는 장치(1000 W까지) 이동장치에 의해 실험기 밖에서 하부지점에서 상부지점까지 이동한다. 외부의 빛을 차단하기 위해 차광막을 침강수주의 윗 부분에 설치하였다(그림 1(b)).

CCD-Camera로 침강 수주에서 점착성 미립자를 촬영한 그림 2에서처럼 화면의 신호가 A/D변환기로 디지털 값으로 전환되며, 컴퓨터에 저장된다. 빛을 흡수한 미립자들은 CCD-Camera에 의해 서로 다른 선명도 정보와 영상 이미지 그림으로 보여준다. CCD-Camera에 의해 촬영된 그림 정보(화상도 값)를 10진법으로 전환시킨다. 이 형상을 매트릭스 그림으로 나타내며, 화상도의 크기는 160×120 pixels(전체 수는 19,200) 이다. 또한 디지털 카메라로 측정된 영상 이미지 그림은 256개의 선명도로 보여지며, 가장 어두운 경우 0값을, 가장 밝은 경우 256 값을 뜻한다.

그림 3은 일반 수돗물 안에서 점착성 미립자의 시간-농도변화를 CCD-Camera으로 촬영하여 영상 이미지

로 나타내었다. quartz의 5,000 mg/l 초기 농도가 시간이 지나면서 그 선명도가 변화하며, 초기 시간 t = 0 일 때 가장 어두운 영상 이미지로 보여주고 있으며, 즉 농도가 거의 물에 침전이 되지 않고 있다는 뜻이다. 또한 측정시간 t = 540분 일 때는 가장 밝은 형상을 나타낸다. 이는 미립자가 거의 모두 침강이 되었다는 것을 말한다.

위에서 언급한 원리를 기초로 각각 선택된 재료 종류에 따라 초기 농도값 C<sub>0</sub>, C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub> 가 변화할 때 측정된 영상 이미지와 영상(picture) 정보값으로 기준 곡선이 만들어지며(그림4), 측정된 회상도에서 얻은 평균 디지털 데이터 값과 기준곡선에 있는 초기 농도에 의해 만들어진 값과 비교분석을 통해 농도값을 정한다.

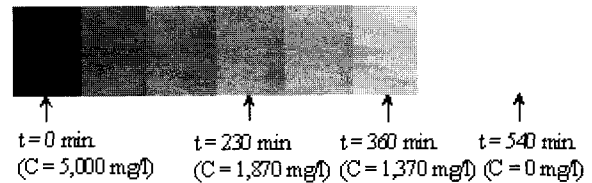


그림 3. quartz의 침강 선명도

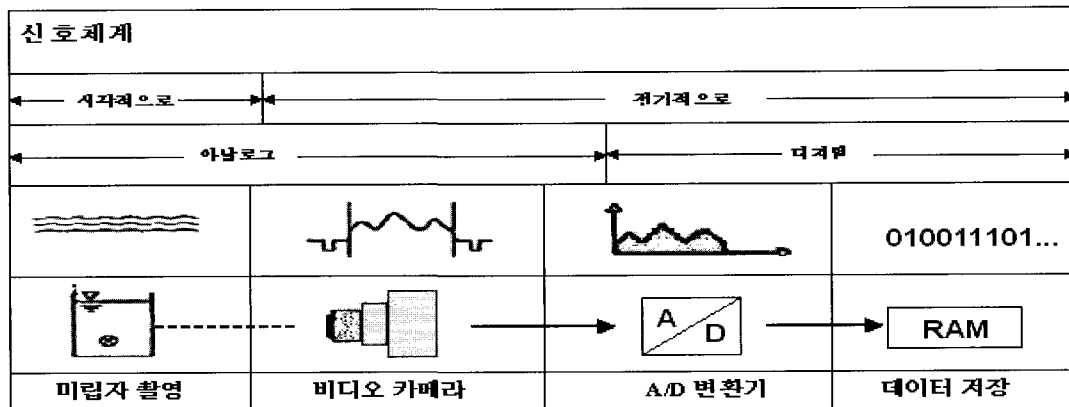


그림 2. 농도측정을 위한 CCD-Camera의 신호변환체계

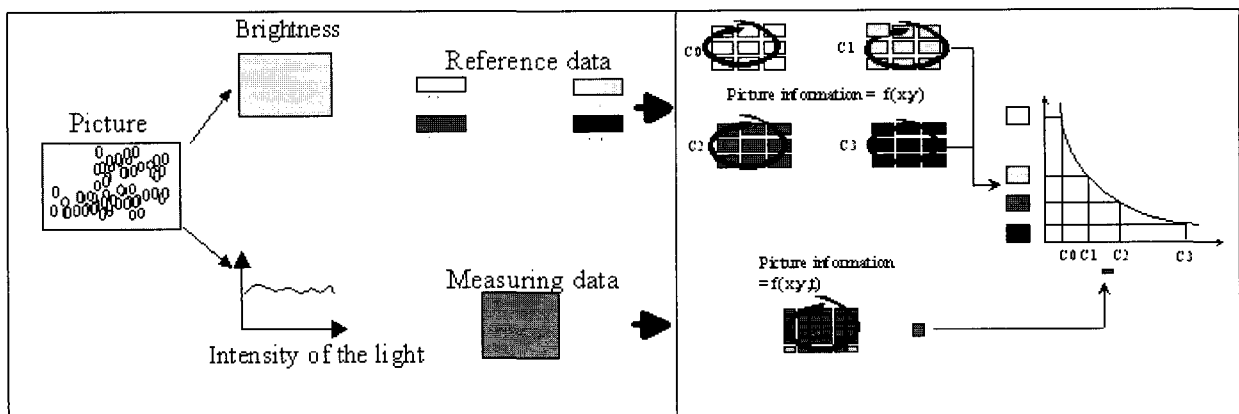


그림 4. CCD-Camera를 이용한 농도 측정 방법 명시도

## 2.2 CCD-camera의 test 및 농도 비교 분석

실험전 실험재료에 사용된 점착성 미립자의 alumina와 quartz를 CCD-Camera로 우선 초기농도 곡선을 결정하였다. 탁도 때문에 강한 빛이 필요하였으며, 점착성 미립자 alumina인 경우 농도 범위 0 mg/l에서 20,000 mg/l까지 각각 빛의 강도 270 W, 320 W, 650 W, 1,000 W를 사용하였다. Quartz인 경우는 각각 270 W, 300 W, 450 W, 1,000 W 등의 빛의 강도가 필요하였다. 초기 농도에 측정된 빛의 강도의 크기에 따라 만들어진 지수함수적 관계식은 아래 식(1)으로 표현할 수 있다.

$$N = N_0 e^{-k \cdot C} \quad (1)$$

여기서  $N$ 은 각 초기 농도에 의해 측정된 빛의 출구 강도이다. 각각 독립변수인  $N_0$ 와  $k$ 는 측정 농도 값을 결정하기 위해 계산된다. 표 1에서와 같이 상수  $k$ 는  $SiO_2$ 에서 0.1036에서 2.427까지 측정되었으며, 미립자

alumina에서는 0.0597에서 3.153까지 변화한다. 두 미립자의 상관계수는 0.92에서 0.98까지 변화하였다(표 1). CCD-Camera로 quartz와 alumina의 농도를 20,000 mg/l까지 측정할 수 있었다.

그림 5는 점착성 미립자 alumina의 농도-시간 변화를 나타내었다. 또한 탁도 센서인 CUS41(회사명 Endress Hauser, 독일 stuttgart)에 의해 측정된 농도 값과 CCD-Camera로 측정한 값을 비교분석 하였다(그림 5). 초기 농도 값은 각각 1,000 mg/l와 20,000 mg/l이며, 그림 5에서 비교분석한 값들을 통해 알 수 있듯이 큰 차이점 없이 시간변화에 따른 농도를 감소 현상을 보였다. 일반적으로 부유사안에서 탁도를 측정하는 센서는 농도측정을 할 때 센서의 농도값에 대한 영향을 배제할 수 없다. 그러나 본 연구에 사용된 CCD-Camera는 침강 수주 외부에서 농도측정을 하기 때문에 이런 영향을 극복할 수 있었으며, 측정값의 정확도를 향상시켰다.

표 1. 빛의 강도에 따른 농도를 결정하기 위한 함수

점착성 미립자	농도 측정 범위 (g/l)	농도 계산을 위한 측정 방정식(g/l)	빛의 강도(W)	상관계수
Quartz	0.0 - 0.5	$N = 33743e^{-2.4277 \cdot C}$	270	0.9255
Quartz	0.5 - 1.0	$N = 20573e^{-0.6009 \cdot C}$	300	0.9425
Quartz	1.0 - 7.0	$N = 34214e^{-0.2179 \cdot C}$	450	0.9909
Quartz	7.0 - 20	$N = 62480e^{-0.1036 \cdot C}$	1,000	0.9324
Alumina	0.0 - 0.5	$N = 32757e^{-3.1538 \cdot C}$	270	0.9395
Alumina	0.5 - 1.0	$N = 16559e^{-0.7396 \cdot C}$	320	0.9764
Alumina	1.0 - 10	$N = 40081e^{-0.1764 \cdot C}$	650	0.9876
Alumina	10 - 20	$N = 27185e^{-0.0597 \cdot C}$	1,000	0.9865

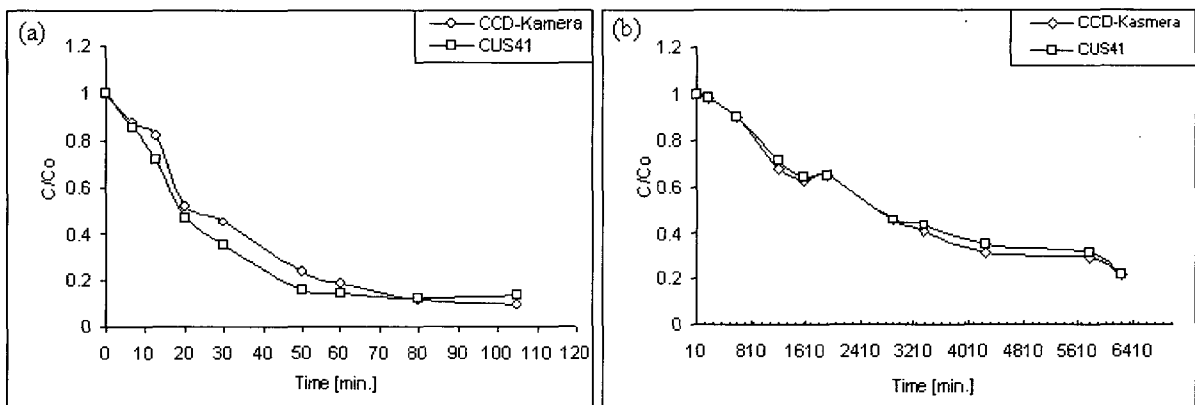


그림 5. 탁도 측정기 CUS41와 CCD-Camera를 통한 측정된 농도 비교(h = 215 mm)

### 3. 실험결과

하천유사(fluvial sediment)는 점토, 실트와 같이 미립 토사인 점착성 유사(cohesive sediment)와 입자간에 점착성이 없는 모래, 자갈과 같은 비점착성 퇴적물(noncohesive sediment)로 나뉜다. 점착성 광물의 주요 군은 montmorillonite( $Al_2(OH)_2Si_4O_{10}$ ), kaolinite( $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ ), illite( $K_xAl_4(Si_{3-6}Al_{0-2})O_{20}(OH)_4$ )로 구분한다. 점토는 많은 양의  $SiO_2$  성분과  $Al_2O_3$  성분으로 이루어져 있다. 예를 들면 montmorillonit은  $SiO_2$ 의 성분이 질량 기준으로 42 - 55 %,  $Al_2O_3$ 의 경우 0 - 28 %이며, kaolinite은  $SiO_2$ 의 성분이 질량기준으로 45 - 47 %,  $Al_2O_3$ 은 38-40 질량 %로 구성되었다. 또한 illite는  $SiO_2$ 의 성분이 50 - 56 %,  $Al_2O_3$ 의 경우 18 - 31 %로 되어있다. 그러므로 본 실험을 위해 하천에 많이 녹아 있는 점토광물 중에 quartz( $SiO_2$ )와 alumina( $Al_2O_3$ )를 선택하였다. 점착성 미립자 alumina의 중앙입경은 0.7  $\mu m$ (pH 7,  $\rho = 2.65 g/cm^3$ )이며, quartz( $\rho = 3.94 g/cm^3$ )의 중앙입경은 3.5  $\mu m$ 이다.

그림 6은 시간변화에 따른 물리-화학적 인자(초기 농도 변화, pH)의 농도변화를 나타내었다(측정위치 h

= 215 mm). 그림 6(a)은 alumina의 초기 농도  $C_0$ 가 1,000 mg/l, 5,000 mg/l, 20,000 mg/l 까지 변화시켰을 때 농도-시간변화를 나타내었다. HCl의 첨가로 alumina의 농도 변화가 약 1,000분 동안 거의 평형농도(equilibrium concentration)를 보였으며, 초기농도변화는 농도-시간 곡선에 영향을 주지 않는다(pH 4). pH 9에서는 모든 경우 농도  $C_0$ 가 시간이 지나므로 감소하는 것을 보였으며, 20,000 mg/l 까지 침강물에 초기농도가 영향을 끼치는 것을 측정하였다. 초기 농도의 증가에 따라 미립자와 미립자 사이의 거리가 짧아져 응집(flocculation)현상이 일어나 입자의 크기가 더 커진 미립자 덩어리 때문에 초기 농도가 큰 값이( $C_0 = 20,000 mg/l$ ) 가장 침강물이 커지는 것을 나타내었다.

그림 7은 미립자 alumina의 초기 농도 변화와 pH의 영향 아래 입경 분포를 나타낸다. pH 4.0일 때는 초기 미립자 농도와 상관없이 중앙입자지름  $d_{s,50}$ 은 약 0.15  $\mu m$ 이며, pH 9.0일 때는 초기 농도 변화에 따라 그 크기가 증가 한다. 예를 들면 초기 농도값 20,000 mg/l 일 경우 20  $\mu m$ 로 약 133배 입자의 크기가 커지는 것을 볼 수 있다. 그러므로 알칼리도에서 미립자 alumina의 침강시간은 10분에서 70분 안에 모든 미립자들이

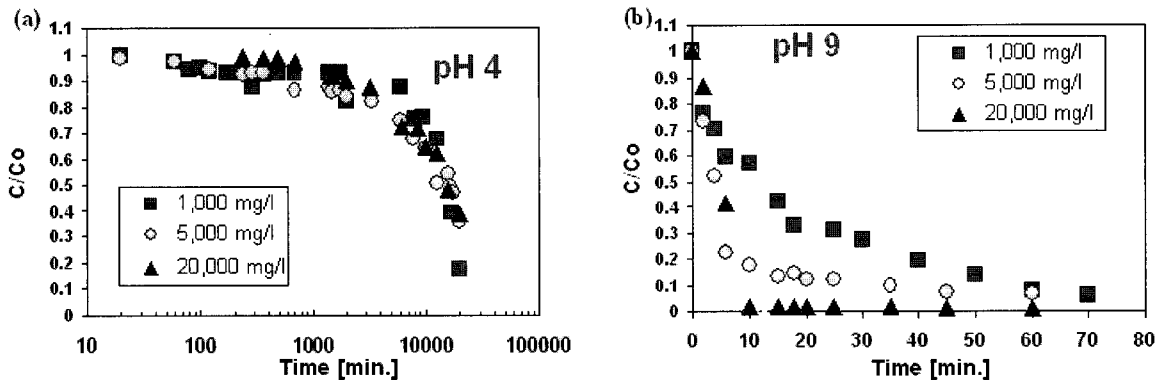


그림 6. 초기 농도 변화에 따른 (a)pH 4와 (b)pH 9에서 농도 변화 곡선

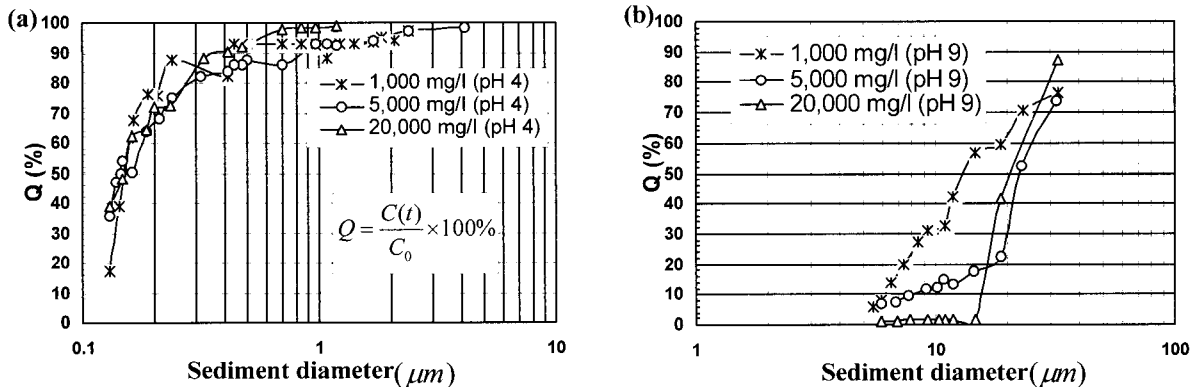


그림 7. 초기 농도 변화에 따른 (a)pH 4와 (b)pH 9에서 alumina의 입경 분포

침강 된다(초기농도  $C_0$  1,000 mg/l 와 20,000 mg/l, 측정 높이  $h = 215$  mm).

측정시간 300분 후 초기농도 1,000 mg/l인 부유사(quartz, alumina)에 NaCl의 농도 0.5g/l, 5g/l, 10g/l, 15g/l로 변환시키며 미립자의 높이 65 mm, 115 mm, 165 mm, 215 mm, 265 mm, 315 mm, 365 mm에서 농도변화를 조사하였다. 그림 8에서 알 수 있듯이 중성에서 미립자 alumina와 quartz의 침강현상에 염분의 영향이 매우 큼을 나타내었다. NaCl이 0 g/l 와 0.5 g/l인 경우 점착성 미립자(alumina, quartz)의 침강률이 작지만, 반대로 NaCl을 5 g/l 첨가 이후부터 미립자는 응집(flocculation)형상 때문에 매우 빨리 농도의

연직분포가 감소한다. 특히 alumina의 농도의 연직 분포가 quartz보다 더 NaCl에 민감하게 반응을 한다.

그림 9는 quartz의 초기농도 값이  $C_0 = 1,000$  mg/l 일 경우 바닥면에서 부터 높이가 400 mm인 위치에서 NaCl의 영향 아래 위치별 부유사 농도 값 변화를 나타내었다. 8시간이 지난 후 농도의 연직 분포가 염분을 첨가하지 않을 경우 215 mm 높이에서 약 700 mg/l이며(그림 9(a)), NaCl이 5 g/l인 경우 같은 높이에서 약 330 mg/l를 보였다(그림 9(b)). 특히 NaCl을 10 g/l 및 15 g/l인 경우는 침강수주의 측정 높이 215 mm에서 연직분포 농도값이 0 이었다(그림 9(c)와 9(d)).

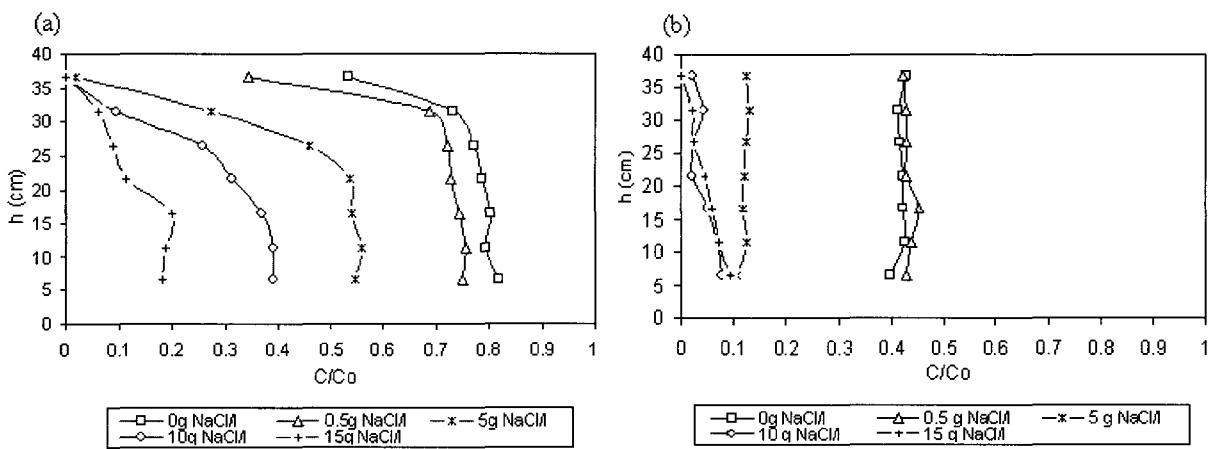


그림 8. 초기 농도 1,000 mg/l 의 NaCl에 따른 (a)quartz(pH 6.5)와 (b)alumina(pH6.6)에 농도의 연직분포

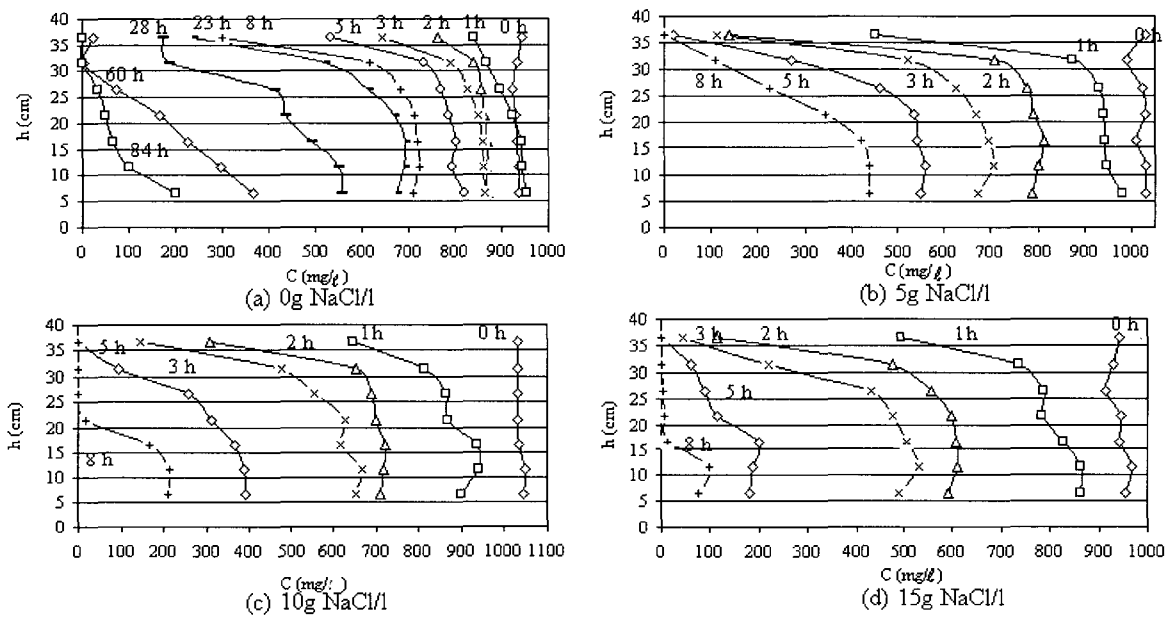


그림 9. 초기 농도 1,000 mg/l 의 NaCl에 따른 (a)quartz와 (b)alumina의 연직분포 농도

그림 10은 농도의 연직분포의 영상이미지(picture)와 농도 변화 단면도를 나타낸다. 앞서 언급한 것처럼 NaCl을 첨가 하지 않을 경우에 측정 시간 480분에서 부유사의 침강이 거의 일어나지 않는다는 것을 의미한다. 모든 부유물의 미립자가 NaCl이 10 g/l 및 15 g/l 인 경우 위치 215 mm에서 거의 침전이 되었음을 보여주고 있다.

그림 11은 quartz의 초기농도 1 g/l (19.2°C), 3 g/l (22.7°C), 7 g/l (20.2°C) 및 15 g/l (20.5°C)에서 초기 온도변화를 통한 각각 농도의 연직분포를 나타내고 있

다. 측정시간 60분에서는 큰 차이 점 없이 초기 농도 값이 침강률에 영향을 미치고 있다(그림 (a)). 그러나 180분 이후 수직 방향 농도에 초기 농도 값이 영향을 미칠 뿐 아니라 부유물의 온도에 민감하게 반응을 하는 것을 볼 수 있다(그림 10(b)). 무차원 침강수주 높이 (h/Ho) 0.3에서 초기농도 3 g/l (22.7°C)의 침강 농도 값이 약 0.54인 반면 7 g/l (20.2°C)의 침강 농도 값이 약 0.6정도 측정되었다(그림 10(c)). 초기 농도 3 g/l (22.7°C)의 연직 방향 분포가 점점 더 시간이 지나므로 침강률이 증가하는 것을 나타내었다(그림 (d)).

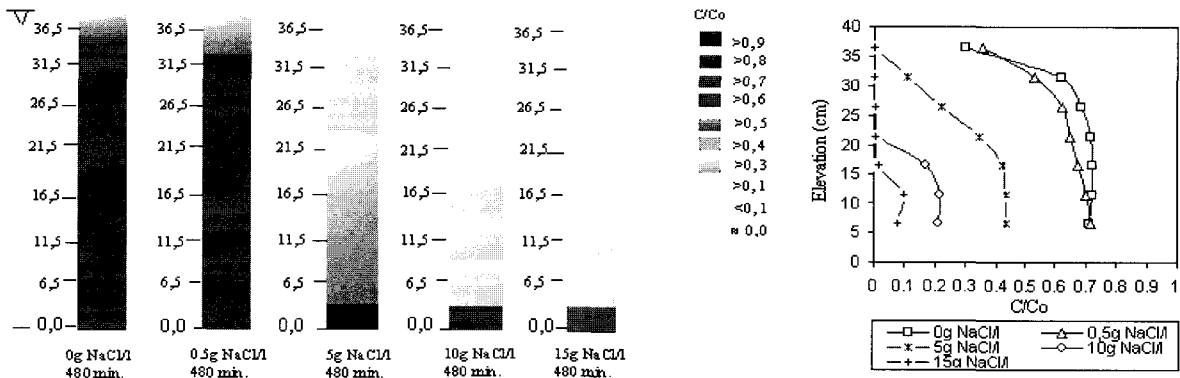


그림 10. NaCl의 영향과 농도 단면도(침점물: quartz C0 = 1,000 mg/l)

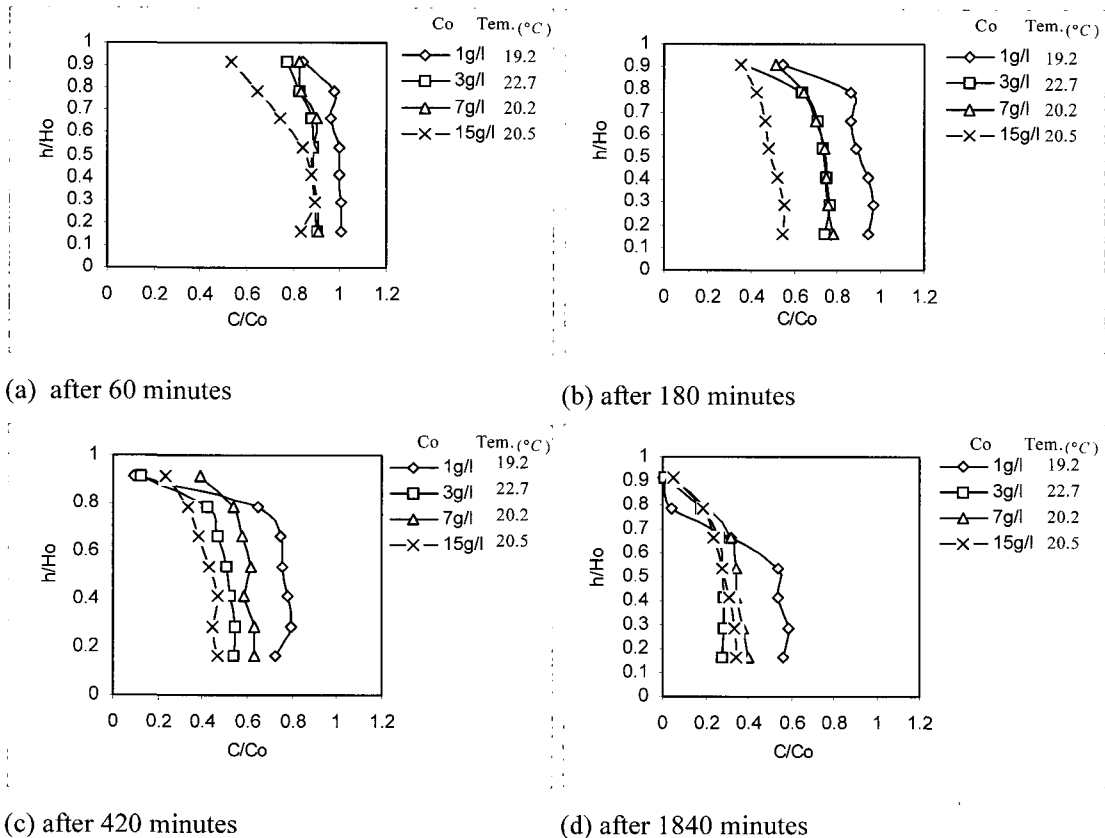


그림 11. 초기 농도 변화와 온도 변화에 따른 농도의 연직 분포(quartz)

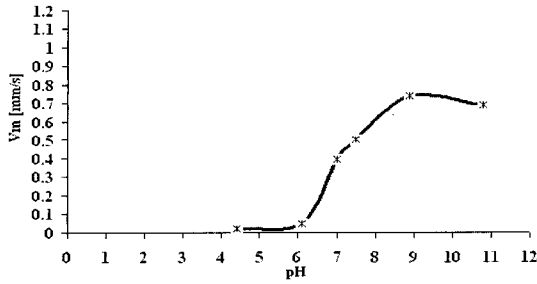


그림 12. 미립자 alumina의 초기농도  $C_0 = 8,000$  mg/l에서 pH영향아래 평균속도

그림 12는 미립자 alumina의 pH변화로 인한 평균 속도변화를 보여주고 있다(Kim, 2004). Alumina의 표면은 일반적으로 pH의 산소이온 또는 수소이온으로 인해 입자표면전하가 변한다. 입자 주위에 형성된 전하층이 pH로 인해 짧아져 수중에 녹아 있는 이온의 결합으로 응집(floc)이 쉽게 일어난다. 또한 이런 현상으로 입자의 지름이 커져 입자의 속도가 빠르다. 미립자(alumina)의 초기농도가 8,000 mg/l일 때 HCl의 첨가로 산성화된 부유물속에서 alumina 미립자의 평균 침강속도는 크게 감소하며, NaOH의 첨가로 알칼리도에서 입자간의 응집현상이 커져 입자의 평균속도가 증가함을 나타낸다. pH 7에서는 0.40 mm/s 이고 pH 8.9에서는 0.75 mm/s 최대 평균속도를 갖는다. 그러나 pH 9를 지나서는 미립자의 침강속도가 감소하는 현상을 나타낸다.

#### 4. 결론

본 연구는 정지수면 조건하에 전기화학적 인자(NaCl, 미립자의 농도, 온도 및 pH)들을 고려하여 부유성인 alumina와 quartz 점착성 미립자의 민감도 실험을 실시하였다. 미립자의 연직분포 농도(vertical concentration)는 부유 점착성 미립자 안에서 센서의 영향에 매우 민감하게 반응하므로 침강수주 밖에서 CCD 디지털 카메라로 측정하였다. Flocculation(플록 형성)의 파괴 없이 부유사의 연직분포의 농도를 20,000 mg/l 까지 잴 수 있었으며, 실험재료는 하천에 녹아있는 점토광물 중에 주요성분인 quartz와 alumina를 선택하였다. 점착성 미립자(quartz와 alumina)의 연직분포 농도는 물리-화학적 인자들(NaCl, 미립자의 농도, 온도 및 pH)에 따라 크게 변하며, 실험으로 증명된 연구결과는 아래와 같다.

1. NaCl의 첨가로 수중에서 부유된 미립자(quartz와 alumina)성분에 관계없이 플록현상을 일으켜 입자의 크기의 증가로 농도의 연직분포가 급히 감소하

는 것을 관측하였다. 또한 alumina가 quartz보다 더 빨리 농도연직 분포가 감소하는 것을 보였다.

2. quartz의 초기 농도( $C_0$  3 g/l (22.7°C))가 적은 양이라도 부유사의 온도가 20°C 이상 높을 경우 연직 분포의 농도변화에 큰 영향을 주고 있다. 초기 농도 증가 뿐 아니라 부유사 온도가 미립자 침강률에 영향을 준다.

3. 점착성 미립자 alumina의 침강현상에 pH의 영향이 매우 큼을 보였다. pH 4.0에서 점착성 부유사(alumina)의 침강이 거의 일어나지 않으며, 이때 미립자의 중앙입자지름  $d_{s,50}$ 은 약 0.15  $\mu m$ 인 반면 반대로 pH 8.9에서는 미립자의 플록형성 때문에 중앙입자지름이 약 100배 이상 커져 (13 - 23  $\mu m$ ) 80분안에 모든 입자가 가라앉는 것을 측정할 수 있었다. 더욱이 특이하게 관측된 연구 결과는 pH 9.0 이후 침강속도가 점점 감소하는 것을 보였다. 그러므로 미립자의 농도의 연직분포에 영향을 주는 인자들을 아래와 같이 간단히 표현 할 수 있다.

f(NaCl량, 미립자의 초기농도, 미립자의 크기, pH, 온도, ...)

실험에서 알 수 있듯이 하천에 부유된 다른 점착성 미립자(montmorillonite, kaolinite, illite)의 거동 조사를 위해 물리-화학적인 인자(미립자의 구성요소, 물에 녹아 있는 이온, 흐름 조건, 전단력 변화)의 영향을 고려한 기초 연구가 더 요구된다.

#### 참고 문헌

- Daniels, H and Bodarwe, H (1995) *Modelluntersuchungen zum Stroemungs- und Transportverhalten in Kluftflaechen mit stark variierenden Oeffnungsweiten*, 1. Arbeitsbericht zum DFG-Forschungsvorhaben Da 264/5 - 1, Institut fuer Wasserbau und Wasserwirtschaft, RWTH Aachen
- Haenscheidt, P. (1987) *Zur digitalen Bildverarbeitung bei wasserbaulichen Stroemungsuntersuchungen*, Dissertation, Mitteilungen des Instituts fuer Wasserbau und Wasserwirtschaft, RWTH Aachen.
- Kim, J.W. (2004) *Mobilisierung und Immobilisierung von mineralischen Feinstkornaggregaten an Gewaessersohlen*. Dissertation, Institut fuer Wasserbau und Kulturtechnik(IWK), Universitaet Karlsruhe.
- 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.  
Mehta, A.J. and Partheniades, E. (1975) "*An  
Investigation of the Depositional properties of  
flocculated Fine Sediments.*" *Journal of Hydraulic  
Research*, 13(4): pp. 361-381.  
Partheniades, E. and Kennedy, J.F. (1966) "Deposi-  
tional Behaviour of Fine Sediment in a Turbulent  
Fluid Motion." *Pro. 10th Conference on Coastal*

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

© 논문접수일 : 2004년 12월 31일

© 심사의뢰일 : 2005년 01월 13일

© 심사완료일 : 2005년 02월 14일