

점착성 유사의 침강속도, 크기, 밀도 측정 프랙탈 차원 분석

손민우*

(인하대학교 자연과학대학)

Measurement of Settling Velocity, Size and Density and Analysis of Fractal Dimension of Cohesive Sediment. Son, Minwoo* (College of Natural Science, Inha University, Incheon 402-751, Korea)

This study aims to investigate the settling velocity of aggregates of cohesive sediment (floc) and its relationship with sediment size, density and fractal dimension. A system of commercial camera and macro-lens is used for the experiment. Through the image-analysis technique, the image taken by the camera system is analyzed. For the experiment, kaolinite and a natural sediment sampled at Lake Apopka in Florida have been tested. From this study, it is known that kaolinite and Lake Apopka sediments show different behaviors mainly depending on the organic matter content. Samples of kaolinite with less organic contents show a more definite trend to follow a fractal theory and relatively strong relationships between the settling velocity, density, fractal dimension and floc size compared to the Lake Apopka sediments rich in organics.

Key words : cohesive sediment, floc, settling velocity, fractal dimension

서론

하천, 호소, 해안 지역 등에 존재하는 점착성 유사의 크기와 밀도는 응집현상(Flocculation Process)을 통해 지속적으로 변화한다. 이 변화는 점착성의 유사가 가지는 침강속도의 변화를 야기하여 유사의 부유 및 퇴적에 중요한 영향을 야기한다. 이러한 성질은 고정적인 크기, 밀도, 침강속도를 가지는 모래 등의 비점착성 유사에 비해 점착성 유사와 관련된 문제를 좀더 이해하기 어렵게 만드는 이유가 된다. 유사의 이동과 관련된 이송, 침강, 침식, 퇴적 등의 여러 인자들 중 유사의 침강속도는 흐름과 관련이 없이 유사 자체가 가지는 성질로 가장 중요하게 고려되어야 할 요소 중 하나이다(Dyer, 1997; Winterwerp and van Kesteren, 2004). 하지만 많은 연구에서 침강속도를 보정이 가능한 하나의 매개변수로 고려하여 유사의 농도를 계산하고 있다(Maa and Kwon, 2007). 따라서 유

사가 가지는 침강속도라는 특성을 보다 정확하고 정량적으로 측정하여 모형의 적용 등에 이용할 필요가 있으며 가변적인 크기와 밀도를 가지는 점착성 유사의 경우에는 보다 다양한 관점에서의 연구가 필요하다. 특히 침강속도가 유사의 크기와 밀도에 의해 결정된다는 사실을 고려할 때 자연조건에서 부유하는 점착성 유사의 밀도와 크기를 결정하는 연구가 중요하다는 점을 알 수 있다. 하지만 점착성 유사는 표본을 채취할 경우 교란이 심하게 발생하여 자연에 존재할 당시의 크기와 밀도를 유지하지 않는다는 점이 이에 대한 연구를 어렵게 만든다.

자연상태에서 존재하는 점착성 유사는 입자가 개별적으로 떨어져 존재하지 않고 작은 입자들이(일차입자, Primary Particle) 뭉쳐진 형태인 플럭의 상태로 존재한다. 플럭은 크기에 따라 밀도가 변화하는 것으로 알려져 있고 쉽게 부서지는 성질이 있다. 하지만 이들의 값을 정량적으로 연구하는 시도는 드물다(Eisma *et al.*, 1990). 유사 침강속도에 관련된 최초의 현장연구 중 하나는 Owen 튜

* Corresponding author: Tel: 032) 860-7707, Fax: 032) 862-5236, E-mail: minwooson@gmail.com

브를 통해 이루어졌다(Owen, 1976). 하지만 Owen 튜브를 이용한 측정은 자연상태에서 존재하는 점착성 유사의 덩어리(플럭, Floc)을 교란시키는 문제점이 있어 많은 사람들에게 의해 실험방법이 개선되어 왔다(Dyer *et al.*, 1996). 점착성 유사에 대한 연구의 초기단계에서는 교란을 최소화한 시료채취를 위해 잠수부 등이 직접 수중에서 시료를 채취하는 방법이 널리 이용되었다(Eisma, 1986). 하지만 이러한 방법으로는 시행 자체의 어려움 등으로 인해 한정된 수의 실험자료만을 수집할 수 있었다. 코울터계수기(Coulter Counter)나 피펫(Pipette) 실험 등을 통해서 보다 많은 실험을 시도하는 노력이 있었지만 이들 방법은 실험도중 플럭이 부서져 점착성 유사의 크기가 감소하고 밀도가 증가하는 문제점을 나타내었다(Gibbs, 1982). 최근 들어 비디오카메라 등의 광학기계를 이용하여 이러한 문제점을 개선하려는 연구가 활발히 진행되고 있다. Netherlands Institute for Sea Research는 현장에서의 이용이 가능하고 코울터계수기나 Laser-Fraunhofer 회절을 이용한 실험장비와 유사한 정도의 정확도를 나타내는 광학기계(NIOZ)를 이용한 측정시스템을 개발하였다(Eisma and Kalf, 1996). Sternberg *et al.* (1999)는 고해상도의 비디오 카메라를 유사트랩에 장착하여 부유된 플럭의 침강속도를 측정하였다. 그 연구를 통해 유사의 형상이 침강속도의 결정에 미치는 영향이 13% 이내라는 사실이 알려졌다. 하지만 침강속도의 결정에 밀도와 크기의 상관관계가 큰 영향을 준다는 것이 알려져 밀도를 결정하는 과정이 중요하다라는 점 역시 주장되었다. Hill *et al.* (2001)은 플럭카메라를 이용하여 난류응력이 존재하는 조건에서의 플럭의 크기 변화를 측정하였다. 하지만 그들이 이용한 플럭카메라는 플럭의 크기가 250 μm 이상인 경우에만 측정이 가능하였고, 그 결과, 약 0.1 Pa 정도의 난류응력에서도 플럭이 관찰되지 않는 문제점을 보고하였다. 실제 자연에 존재하는 플럭의 크기가 수 μm 에서 수백 μm 의 범위에 다양하게 존재한다는 사실을 고려할 때 이들의 연구결과는 큰 플럭의 거동만을 관찰할 수 있다는 단점이 있다. Agrawal and Traykovski (2001)은 LISST-100 Laser Particle Sizer를 이용하여 Hill *et al.* (2001)이 측정하지 못한 작은 크기의 플럭이 나타내는 특성을 관찰하였다. 하지만 이들이 사용한 장비는 500 μm 이상의 크기를 가지는 플럭을 촬영하지 못하는 단점을 나타내었다. 이러한 결점을 보완하는 노력의 일환으로 Mikkelsen *et al.* (2006)은 LISST-100 type C와 플럭카메라를 병행하여 다양한 크기의 플럭의 침강속도 및 크기 변화를 측정하였다. 이들은 두 장비를 병행할 경우 2.5에서 9,900 μm 까지의 플럭을 관찰할 수 있다고 보고하였다.

본 연구의 목적은 시료채취에 따른 교란을 배제할 수 있도록 광학기계(산업용 카메라)를 이용한 간단한 방법을 통해 점착성 유사의 크기 및 침강속도를 측정하여 특성을 분석하고 이를 기본자료로 이용하여 밀도와 프랙탈 차원을 계산하는 것이다. 이를 위해 미국 플로리다 주의 Lake Apopka에서 채취한 점착성 유사와 실험을 위해 정제된 카올리나이트(고령토, Kaolinite)의 침강을 실험실에서 재현하였다. 이후 유사의 침강을 고해상도의 산업용 카메라로 촬영하고 이미지 분석을 통해 침강 당시의 유사 크기와 침강속도를 결정하였다. 결정된 값과 Stokes' Law를 이용하여 유사의 밀도를 결정하고 프랙탈 차원을 계산하였다. 본 연구는 실험의 방법론적인 개발에 초점을 맞춘 것이 아니라 간단한 장비를 통해서 점착성 유사의 침강속도를 관측하고 이들이 가지는 크기 및 프랙탈 차원의 관계를 이해하는 것을 주목적으로 설정하였다.

재료 및 방법

유사의 침강속도(V)는 유사가 정지된 물에서 낙하할 때의 종말속도이다(Yang, 1996). 많은 연구에서 침강속도는 Stokes' Law(식 1)에 의해 계산된다.

$$V = \frac{(s-1)gD^2}{18\nu} \quad (1)$$

이 식에서 s 는 유사의 단위 중량, g 는 중력 가속도, D 는 유사의 크기이다. ν 는 동점성계수로 $1.095 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ 로 가정된다. 식 1을 점착성 유사인 플럭에 적용하고 플럭의 밀도를 ρ_f , 물의 밀도를 ρ_w 로 두면 식 2에 의해 침강속도로부터 플럭의 밀도를 계산할 수 있다.

$$\rho_f = \rho_w \left(\frac{18\nu V}{gD^2} + 1 \right) \quad (2)$$

자연에 존재하는 플럭은 자기유사성을 가진 프랙탈 구조체로 이해된다. 이러한 구조체의 경우에는 내부가 많은 일차입자로 구성되었으며 이들 작은 알갱이의 개수를 프랙탈 차원(F)을 통해 결정한다. 플럭을 구성하는 작은 알갱이의 크기가 균일하다는 가정을 이용하면 크기 d 의 일차입자로 식 2를 표현할 수 있다(Kranenburg, 1994).

$$\rho_f = (\rho_s - \rho_w) \left(\frac{D}{d} \right)^{F-3} + \rho_w \quad (3)$$

식 3에서의 ρ_w 는 물의 밀도이며 본 연구에서는 998.7 kg m^{-3} 으로 가정된다. 일차입자의 밀도 ρ_s 를 아는 경우에

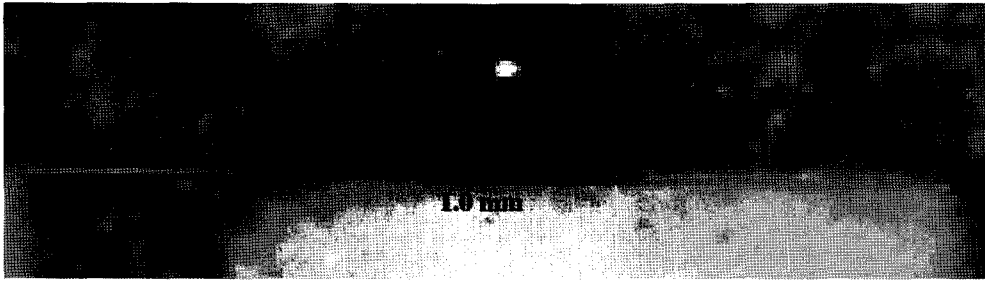


Fig. 1. Size of pixel taken by camera of experiment.

F 를 결정할 수 있는 식은 식 3을 통해 유도된다.

$$F = 3 + \ln\left(\frac{\rho_f - \rho_w}{\rho_s - \rho_w}\right) / \ln\left(\frac{D}{d}\right) \quad (4)$$

본 연구에서는 실험을 위해 정제된 카올리나이트와 미국 플로리다 주의 중부에 위치한 Lake Apopka의 바닥에서 채취된 자연상태의 점착성 유사를 이용하여 플럭의 크기 및 침강속도를 측정하였고, 이후 측정된 침강속도와 식 2, 식 4를 이용하여 플럭의 밀도와 프랙탈 차원을 산정하였다. 이를 위하여 일정 양의 유사를 50 cm 길이 실린더 속 1L의 물에 잘 희석한 후 침강시켰다. 실린더 내의 물은 움직임이 없는 정지상태이며 물 속의 열대류에 의한 침강속도의 영향을 배제하기 위해 1일 이상 17°C 항온실에 보관하였다. 실린더는 광학기계의 이용에 용이하도록 투명한 상태로 유지되었다. 물 속에서 침강하는 플럭의 속도를 측정하기 위해 여러 장의 사진을 일정한 시간간격으로 촬영하였다. 종말속도에 도달하면서도 바닥면에 의한 Hindered Settling 효과를 배제하기 위하여 실린더의 중간 부분에서 사진이 촬영되었다. 예비실험을 통해서 카올리나이트 및 Lake Apopka의 점착성 유사의 덩어리, 즉 플럭은 침강 후 15 cm 이내에 종말속도에 도달한다는 사실을 확인하였다. 카올리나이트 실험을 위해서 이용된 유사의 농도는 0.3, 0.5, 0.8, 2.0, 3.0, 5.0, 7.0 g L⁻¹이다. 이들 농도 조건은 실린더 내 1L의 물에 0.3, 0.5, 0.8, 2.0, 3.0, 5.0, 7.0 g의 카올리나이트를 직접 희석하는 방법으로 측정하였다. Lake Apopka 유사의 경우는 일정 양의 유사를 소량의 물과 희석한 이후 피펫을 통하여 실린더 내의 물에 투하하고, 실험이 끝난 뒤 필터를 이용하여 농도를 측정하였다.

촬영된 이미지에 나타나는 플럭의 크기 및 시간당 이동 거리를 산정하기 위해 촬영이 이루어지는 카메라의 각 초점거리별로 이미지의 픽셀당 크기를 측정하였다. 실험을 위해 이용된 카메라 및 렌즈는 상업용 제품인 Canon 400D와 Canon EF 100 mm 렌즈이다. 이들 제품의 최소

픽셀 크기는 약 6 μm로 고려되었다(Fig. 1). 플럭의 크기 및 침강거리 산정을 위한 이미지의 분석은 AutoCAD 프로그램이 이용되었다.

실험에 이용된 카올리나이트의 일차입자 밀도를 측정한 결과 2,357 kg m⁻³으로 산정되었다. Coletta *et al.* (1997)은 카올리나이트 일차입자의 밀도를 2,650 kg m⁻³으로 보고하였으나 카올리나이트가 채취되는 지역에 따라 약간의 밀도차는 존재할 수 있을 것으로 판단된다. 일반적으로 매우 미세한 일차입자의 밀도를 측정하기 위해서는 카올리나이트 입자들 사이에 존재하는 공기층 등을 완벽히 제거하고 매우 정밀한 측정장비를 이용하여야 하는 기술적 어려움이 있으며 많은 연구에서 2,650 kg m⁻³로 카올리나이트 일차입자 밀도를 가정한다(예: Maggi *et al.*, 2007). 따라서 본 연구에서는 두 값을 모두 이용하여 분석을 실시하였다. Lake Apopka에서 채취된 점착성 유사의 밀도를 측정한 결과는 1,710 kg m⁻³이다. 이 값은 전형적인 무기질 점착성 유사의 밀도에 비해 상당히 낮은 값으로 Lake Apopka의 재료가 다량의 유기물을 포함하고 있다는 사실을 알 수 있다.

Coletta *et al.* (1997)의 연구에서 카올리나이트 일차입자의 크기는 2.18 μm로 측정되었다. 하지만 Lee (1995)의 연구에서는 카올리나이트 일차입자의 평균적 크기가 1.2 μm로 제시된다. 따라서 본 연구에서는 두 값이 모두 이용되어 카올리나이트 플럭의 프랙탈 차원을 계산한다. Lake Apopka에서 채취된 점착성 유사 플럭의 프랙탈 차원을 계산하기 위해서는 일차입자의 크기를 4 μm로 가정하였다. 이 값은 van Leussen (1994)의 연구 등에서 자연상태에 존재하는 여러 물질이 섞인 점착성 유사의 일차입자를 가정할 때 널리 이용되는 값이다.

결 과

Gratiot *et al.* (2005)의 연구에서 Fluid Mud와 같이 점

Table 1. Experimental results of kaolinite case.

Floc size (μm)	Settling velocity (mm s^{-1})	Reynolds number	Density (kg m^{-3})	Fractal dimension			
				$2,650 \text{ kg m}^{-3}$, $2.18 \mu\text{m}$	$2,357 \text{ kg m}^{-3}$, $2.18 \mu\text{m}$	$2,650 \text{ kg m}^{-3}$, $1.2 \mu\text{m}$	$2,357 \text{ kg m}^{-3}$, $1.2 \mu\text{m}$
126.2	0.705	0.081	1087.5	2.28	2.33	2.37	2.41
86.1	0.383	0.030	1102.4	2.25	2.30	2.35	2.40
101.8	0.381	0.035	1072.6	2.19	2.24	2.30	2.34
85.0	0.542	0.042	1149.2	2.35	2.40	2.44	2.48
95.8	0.530	0.046	1114.8	2.30	2.35	2.39	2.44
68.2	0.566	0.035	1242.8	2.44	2.50	2.53	2.58
89.8	0.475	0.039	1117.0	2.29	2.34	2.39	2.43
89.2	0.737	0.060	1184.8	2.41	2.46	2.49	2.54
152.7	0.310	0.043	1025.4	2.03	2.07	2.15	2.19

착성 유사의 농도가 수 g L^{-1} 를 초과하는 경우에는 광학 기계를 이용한 이미지 분석이 적합하지 않다는 결론이 제시되었다. 이 결론과 유사하게 이번 실험을 통해서도 유사의 농도가 1 g L^{-1} 를 초과하는 경우에 이미지 분석이 불가능하였다. 그 결과, 유사의 농도가 높아짐에 따라 침강속도를 변화시키는 입자 간의 간섭에 의한 침강속도 감소효과(Hindered Settling Effect)는 실험할 수 없었다.

Lake Apopka에서 채취된 점착성 유사의 경우, 다량의 유기물을 포함하고 있는 것으로 판단되어 자기유사성을 가지는 프랙탈 구조체로 간주할 수 없다(Son and Hsu, 2008). 따라서 본 연구에서 이 재료는 자기유사성을 가지는 전형적인 점착성 유사의 플러크으로는 고려되지 않는다. Table 1과 Table 2는 실험의 결과를 요약한 것이다. Reynolds Number는 입자 레이놀즈 수로 $\text{Re} = VD/v$ 로 계산되며 동점성계수 v 는 1.095×10^{-6} 으로 가정된다. 광학기계의 한계상 촬영된 이미지에 나타난 점착성 유사 중 가시적인 판단이 가능한 것들만 분석이 이루어지기 때문에 이들 표에서 제시된 내용의 평균적인 값을 산출하는 과정은 큰 의미가 없을 것으로 판단된다. 대신 이들 결과를 통해서 점착성 유사의 침강속도에 영향을 주는 요소들과 프랙탈 차원에 의한 밀도 계산 등 물리적 의미를 이해하는 과정을 본 논문의 주된 분석내용으로 한다. 점착성 유사의 크기와 침강속도 및 밀도 사이의 관계는 Fig. 2에서 도시되었다. 그림에서 원과 마름모는 각각 Lake Apopka 재료와 카올리나이트의 결과를 의미한다. Fig. 3은 플러크 크기와 프랙탈 차원 사이의 관계를 도시한 것이다. Lake Apopka 재료의 경우는 일차입자의 밀도와 크기를 $2,650 \text{ kg m}^{-3}$ 과 $4 \mu\text{m}$ 로 가정하여 계산되었다. Fig. 3(b)에서는 일차입자의 밀도와 크기가 4쌍의 경우로 구분되어 도시되었다. 마름모, 곱하기, 더하기, 정사각형 기호들은 각각 $2,650 \text{ kg m}^{-3}$ 과 $2.18 \mu\text{m}$, $2,357 \text{ kg m}^{-3}$ 과 $2.18 \mu\text{m}$, $2,650$

Table 2. Experimental results of Lake Apopka sediment case.

Floc size (μm)	Settling velocity (mm s^{-1})	Reynolds number	Density (kg m^{-3})	Fractal dimension
66.6	0.075	0.005	1032.5	1.92
67.0	0.137	0.008	1060.1	2.13
70.5	0.075	0.005	1029.0	1.90
80.0	0.077	0.006	1023.0	1.87
103.9	0.113	0.011	1019.8	1.92
77.1	0.226	0.016	1075.2	2.25
249.9	0.554	0.127	1016.5	2.11
231.3	0.832	0.176	1029.9	2.23
128.6	0.517	0.061	1061.5	2.30
181.7	1.079	0.179	1064.4	2.38
205.5	0.870	0.163	1040.1	2.28
235.3	0.830	0.178	1028.8	2.22
293.7	0.785	0.211	1017.0	2.15
114.7	0.977	0.102	1147.9	2.53
114.2	0.800	0.083	1121.7	2.48
375.1	1.424	0.488	1019.0	2.22
92.7	0.278	0.024	1063.7	2.24
91.5	0.669	0.056	1159.2	2.52
100.7	0.659	0.061	1129.2	2.47
88.6	0.642	0.052	1162.7	2.53
242.1	0.881	0.195	1028.9	2.23
245.7	2.803	0.629	1092.0	2.51
133.0	1.190	0.145	1133.9	2.53
244.6	1.114	0.249	1036.1	2.28
176.6	0.613	0.099	1038.2	2.24
151.0	2.096	0.289	1183.3	2.63
118.2	0.686	0.074	1097.3	2.42
111.1	0.078	0.008	1011.4	1.79
116.0	0.355	0.038	1051.6	2.23
144.8	0.871	0.115	1082.1	2.40

kg m^{-3} 과 $1.2 \mu\text{m}$, $2,357 \text{ kg m}^{-3}$ 과 $1.2 \mu\text{m}$ 로 가정된 경우의 결과를 의미한다.

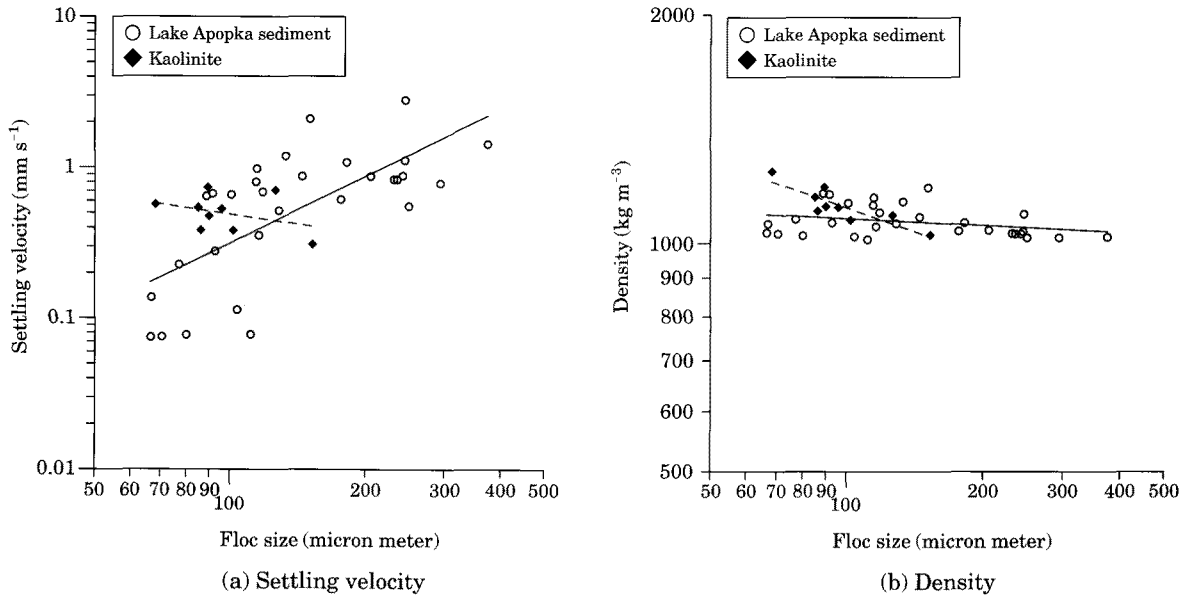


Fig. 2. Relationship between floc size, settling velocity and density.

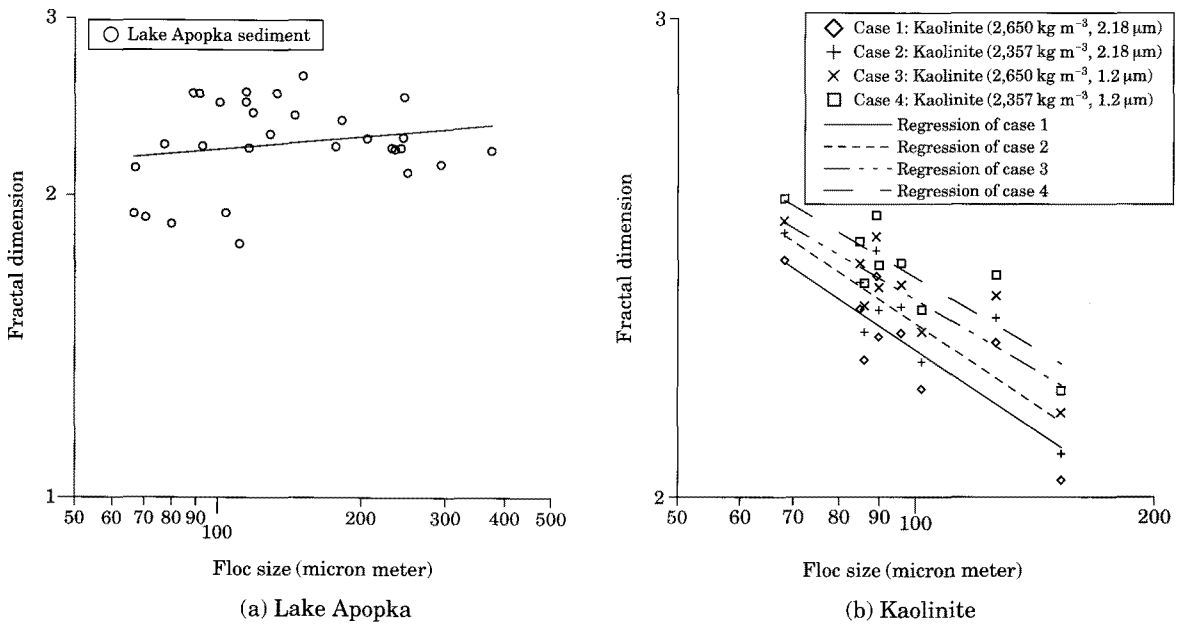


Fig. 3. Relationships between floc size and fractal dimension.

고찰

Table 3은 Fig. 2와 Fig. 3에서 도시된 실험결과의 회귀 분석을 보여준다. 이들 표와 그림을 통해서 카올리나이트와 Lake Apopka 점착성 유사가 서로 다른 결과를 보이

는 것이 확인된다. Lake Apopka 점착성 유사의 침강속도가 플럭의 크기에 분명히 비례하는 것에 비해 카올리나이트의 경우는 플럭의 크기에 큰 영향을 받지 않거나 약간 반비례하는 결과를 나타내었다. 식 2로부터 플럭의 침강속도는 플럭 밀도와 플럭 크기의 제곱에 비례한다는 사실을 알 수 있다. 따라서 카올리나이트의 밀도는 플럭의

Table 3. Regression analyses of experiment results.

	Case	Regression equation	R ²
Settling velocity	Lake Apopka sediment	$V=0.00036D^{1.47}$	0.49
	Kaolinite	$V=3.549D^{-0.43}$	0.12
Density	Lake Apopka sediment	$\rho_f=1234.36D^{-0.029}$	0.09
	Kaolinite	$\rho_f=2889.92D^{-0.207}$	0.75
Fractal dimension	Lake Apopka sediment	$F=1.83D^{0.042}$	0.04
	Kaolinite (2,650 kg m ⁻³ , 2.18 μm)	$F=5.54D^{-0.194}$	0.69
	Kaolinite (2,357 kg m ⁻³ , 2.18 μm)	$F=5.70D^{-0.196}$	0.70
	Kaolinite (2,650 kg m ⁻³ , 1.2 μm)	$F=5.18D^{-0.170}$	0.71
	Kaolinite (2,357 kg m ⁻³ , 1.2 μm)	$F=5.30D^{-0.171}$	0.72

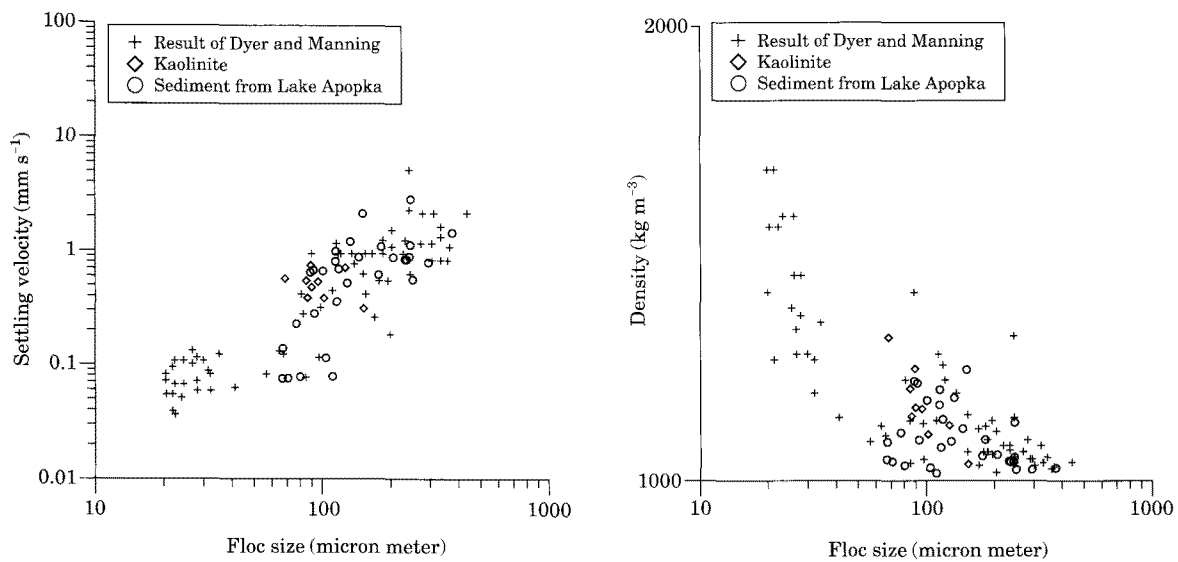


Fig. 4. Results of Dyer and Manning (1999) and this study.

크기가 증가함에 따라 감소한다는 것이 추론된다. 이 추론은 회귀분석 결과 나타난 $\rho_f=2889.92D^{-0.207}$ 을 통해서도 확인되며, Lake Apopka 점착성 유사에 비해, 카올리나이트의 밀도는 플럭의 크기와 밀접한 연관성을 가지는 것으로 판단된다. 하지만 분석을 위해 이용된 실험자료의 개수가 9개에 불과하고 이것이 회귀분석을 통해 전체적인 경향을 대표하기에는 크지 않은 값이라는 점이 고려되어야 한다. 따라서 카올리나이트의 침강속도가 나타내는 플럭의 크기에 반비례하는 관계를 신뢰하기 보다는 유기물이 다량 함유된 Lake Apopka 점착성 유사의 결과에 비해 그 상관성이 적다는 점만을 유념하는 것이 추천된다.

Table 3에서 나타나는 밀도에 대한 회귀분석식에서 보이는 것과 같이 Lake Apopka 점착성 유사 크기의 지수는 거의 0에 가깝다. 이 점은 Lake Apopka 점착성 유사의 밀도는 크기와 큰 상관성을 가지지 않고 거의 일정하다는

것을 의미한다. 플럭이 자기유사성을 가지고 프랙탈 이론을 따를 경우에는 플럭의 밀도가 크기에 따라 큰 변화를 나타낸다(식 3 참고). 따라서 Lake Apopka 점착성 유사 가 프랙탈 이론을 따르는 전형적인 무기질 점착성 유사와 다른 성질을 가진다는 것이 정량적으로 확인된다. Lake Apopka 점착성 유사 가 프랙탈 이론을 따르지 않는 이유를 알기 위해서는 유사 특성을 이해하는 과정이 중요하다. 앞서 언급된 것과 같이 Lake Apopka 점착성 유사 는 다량의 유기물을 포함하고 있는 것으로 판단된다. 프랙탈 이론의 주개념이 자기 유사성임을 고려할 때 생화학적 점착력이 강하고 균일한 크기의 일차입자를 가정하는 것이 불가능한 유기물 점착성 유사에 프랙탈 이론을 적용하는 것은 적합하지 않다. 따라서 본 연구에서는 Lake Apopka 점착성 유사에 프랙탈 이론을 적용하는 것이 적합하지 않다고 판단하여 더 이상 Lake Apopka 점착성 유사의 프랙

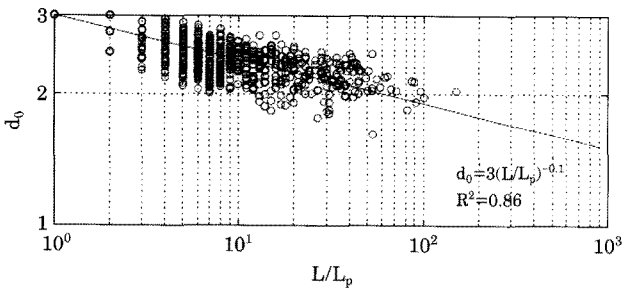


Fig. 5. Relationship between floc size and fractal dimension by Maggi *et al.* (2007) (L : Floc size; L_p : Primary particle size; d_0 : Fractal dimension).

탈 차원에 대한 세부적인 분석은 이루어지지 않는다. 카올리나이트의 경우는 프랙탈 이론과 잘 부합하는 것으로 판단된다. 따라서 플럭의 크기와 프랙탈 차원이 가지는 상관성에 대한 분석이 좀더 구체적으로 이루어질 필요가 있다. Fig. 3(b)와 Table 2의 회귀분석 결과를 통해 카올리나이트의 프랙탈 차원은 플럭의 크기에 반비례한다는 사실을 알 수 있다. 더 나아가 상관계수(R^2) 값을 통해 이들이 강한 상관관계를 가진다는 점도 확인된다. 지수축상에도 시된 결과에서 회귀선이 나타내는 기울기는 약 -0.18 이다. 일차입자의 밀도와 크기가 각각 $2,650 \text{ kg m}^{-3}$ 과 $2.18 \mu\text{m}$ 으로 가정되는 경우, 플럭의 크기가 $50 \mu\text{m}$ 와 $200 \mu\text{m}$ 일 때 프랙탈 차원은 각각 2.6과 2.0이 된다. 한편 일차입자의 밀도와 크기가 각각 $2,357 \text{ kg m}^{-3}$ 과 $1.2 \mu\text{m}$ 으로 가정되는 경우, 플럭의 크기가 $50 \mu\text{m}$ 와 $200 \mu\text{m}$ 일 때 프랙탈 차원은 각각 2.7과 2.1이 된다.

Dyer and Manning(1999)는 네덜란드의 Dollard 하구 부에서 플럭의 크기, 밀도, 침강속도를 측정하였고 그 결과는 본 연구에서 수행한 결과와 함께 Fig. 4에서 나타난다. Fig. 4를 통해서 본 연구의 결과가 Dyer and Manning(1999)가 측정한 결과와 유사한 범위에 포함된다는 사실이 확인된다. 따라서 실험실에서의 간단한 실험을 통해 측정된 본 연구의 결과가 현장에서 실측된 값을 대표하기에 큰 문제점이 없는 것으로 판단된다. Dyer and Manning(1999)에 의해 측정된 침강속도는 본 연구의 Lake Apopka 점착성 유사와 유사하게 플럭의 크기에 비례하는 결과를 나타내지만 카올리나이트를 이용한 결과와는 상반되는 것이다. Maggi *et al.* (2007)은 카올리나이트로 실험실 실험을 실시하고 플럭의 크기와 프랙탈 차원 사이의 상관관계를 분석한 연구를 통해 프랙탈 차원과 플럭의 크기가 반비례한다는 본 연구의 결과와 동일한 결론을 도출하였다(Fig. 5). Khelifa and Hill(2006) 역시 플럭의 크기와 프랙탈 차원의 관계를 연구하여 본 연구의 결

과와 유사한 내용을 제시하였다. 따라서 본 연구에서 나타난 카올리나이트와 Lake Apopka 점착성 유사 사이의 차이점은 실제 자연에 존재하는 경향성을 대표하고 있는 것으로 판단되며 이러한 차이점의 이유는, 앞서 언급된 것과 같이, 유기물의 함량에 따른 결과로 이해된다.

적 요

본 연구는 간단한 실험실 실험을 통하여 점착성 유사의 덩어리인 플럭의 침강속도를 측정하고 이를 이용하여 플럭의 밀도와 프랙탈 차원을 결정하는 것이 목적이다. 이를 위하여 상업용 고해상도 카메라를 이용하여 플럭이 침강되는 모습을 촬영하였고, 이후 이미지 분석을 통해 플럭의 침강속도를 결정하였다. 본 연구를 통해 유기물의 많이 포함된 Lake Apopka 점착성 유사는 플럭의 크기와 침강속도가 비례하는 관계를 가지는 것에 비해 무기질인 카올리나이트는 반비례하거나 거의 상관성을 가지지 않는 것이 확인되었다. 플럭 밀도의 경우 Lake Apopka는 거의 일정한 데 비해 카올리나이트는 플럭의 크기 증가에 반비례하여 밀도가 감소하는 경향이 확인되었고 프랙탈 차원도 유사한 관계를 가지는 것으로 판단된다. Lake Apopka 점착성 유사와 카올리나이트 사이에서 나타나는 이러한 차이점은 유기물 함유에 따라 자기유사성을 가지는 프랙탈 구조체를 구성하는지 여부에 따른 것으로 이해된다. 즉 프랙탈 이론을 따르는 카올리나이트의 경우는 플럭의 크기가 증가하는 동시에 밀도가 감소하여 반비례 관계를 보이는 반면 Lake Apopka의 유기질 점착성 유사는 이러한 경향성을 띠지 않는 것으로 판단된다. 그리고 이 경향성에 따라 플럭의 크기가 증가함에 따라 밀도가 감소하는 카올리나이트의 침강속도에 비해 플럭의 크기 증가할 때 일정한 밀도가 유지되는 Lake Apopka의 점착성 유사와 침강속도와 플럭 크기 사이의 상관관계를 가지는 것으로 고려된다. 이러한 침강속도와 유사 크기 사이의 상관관계를 통해서 고령토 등의 무기질 점착성 유사와 지배적인 자연환경에서는 모래 등의 비점착성 유사의 경우와 다른 관점에서 침강속도를 고려하고 이 특성이 유사의 이송 및 확산에 미치는 영향을 판단할 필요가 있는 사실을 알 수 있다.

사 사

본 연구는 국토해양부 “하구역종합관리시스템개발”의 일환으로 수행되었습니다.

인 용 문 헌

- Agrawal, Y.C. and P. Traykovski. 2001. Particles in the bottom boundary layer: Concentration and size dynamics through events. *Journal of Geophysical Research* **106**(C5): 9533-9542.
- Coletta, T.F., C.J. Bruell, D.K. Ryan and H.I. Inyang. 1997. Cation-enhanced solutions for the electrokinetic removal of Pb from kaolinite. *ASCE Journal of Environment* **123**(12): 1227-1233.
- Dyer, K.R. 1997. *Estuaries: A Physical Introduction*, second ed. Wiley & Sons Ltd., Chichester.
- Dyer, K.R. and A.J. Manning. 1999. Observation of the size, settling velocity and effective density of flocs, and their fractal dimensions. *Journal of Sea Research* **41**: 87-95.
- Dyer, K.R., J. Cornelisse, M.P. Dearnaley, M.J. Fennessy, S.E. Jones, J. Kappenberg, I.N. McCave, M. Pejrup, W. Puls, W. Van Leussen and K. Wolfstein. 1996. A comparison of in situ techniques for estuarine floc settling velocity measurements. *Journal of Sea Research* **36**(1/2): 15-29.
- Eisma, D. 1986. Flocculation and de-flocculation of suspended matter in estuaries. *Netherlands Journal of Sea Research* **20**: 183-199.
- Eisma, D. and J. Kalf. 1996. In situ particle (floc) size measurements with the NIOZ in situ camera system. *Journal of Sea Research* **36**(1/2): 49-53.
- Eisma, D., T. Schuhmacher, H. Boekel, J. van Heerwaarden, H. Franken, M. Laan, A. Vaars, F. Eijgenraam and J. Kalf. 1990. A camera and image-analysis system for in situ observation of flocs in natural waters. *Netherlands Journal of Sea Research* **27**(1): 43-56.
- Gibbs, R.J. 1982. Floc stability during Coulter counter size analysis. *Journal of Sediment Petrology* **52**: 657-660.
- Gratiot, N., H. Michallet and M. Mory. 2005. On the determination of the settling flux of cohesive sediments in a turbulent fluid. *Journal of Geophysical Research* **110**(C6): C06064.
- Hill, P.S., G. Voulgaris and J.H. Trowbridge. 2001. Controls on floc size in a continental shelf bottom boundary layer. *Journal of Geophysical Research* **106**(C5): 9543-9549.
- Khelifa, A. and P.S. Hill. 2006. Models for effective density and settling velocity of flocs. *Journal of Hydraulic Research* **44**(3): 390-401.
- Kranenburg, C. 1994. The fractal structure of cohesive sediment aggregates. *Estuarine Coastal Shelf Science* **39**: 451-460.
- Lee, S.-C. 1995. Response of Mud Shore Profiles to Waves. PhD thesis, University of Florida, May.
- Maa, J.P.-Y. and J.-I. Kwon. 2007. Using ADV for cohesive sediment settling velocity measurements. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* **73**: 351-354.
- Maggi, F., F. Mietta and J.C. Winterwerp. 2007. Effect of variable fractal dimension on the floc size distribution of suspended cohesive sediment. *Journal of Hydrology* **343**: 43-55.
- Mikkelsen, O.A., P.S. Hill and T.G. Milligan. 2006. Single-grain, microfloc and macrofloc volume variations observed with a LISST-100 and a digital floc camera. *Journal of Sea Research* **55**: 87-102.
- Son, M. and T.-J. Hsu. 2008. Flocculation model of cohesive sediment using variable fractal dimension. *Environmental Fluid Mechanics* **8**(1): 55-71.
- Sternberg, R.W., I. Berhane and A.S. Ogston. 1999. Measurement of size and settling velocity of suspended aggregates on the northern California continental shelf. *Marine Geology* **154**: 43-53.
- van Leussen, W. 1994. *Estuarine Macroflocs and Their Role in Fine-grained Sediment Transport*. PhD thesis, University of Utrecht, February.
- Winterwerp, J.C. 1998. A simple model for turbulence induced flocculation of cohesive sediment. *Journal of Hydraulic Research* **36**(3): 309-326.
- Winterwerp, J.C. and W.G.M. van Kesteren. 2004. Introduction to the Physics of Cohesive Sediments in the Marine Environment. In: *Developments in Sedimentology*. **56**. Elsevier, Amsterdam.
- Yang, C.T. 1996. *Sediment Transport: Theory and Practice*. McGraw-Hill, New York.

(Manuscript received 25 January 2011,
Revision accepted 7 March 2011)