

# 시화호 점착성 퇴적물의 침강·침식 특성 매개변수 산정에 대한 실험적 연구 An Experimental Study on Parameter Estimation of Settling and Erosional Properties for Cohesive Sediments in Shihwa Lake

류홍렬\* · 황규남\*\*

Hong-Ryul Ryu\* and Kyu-Nam Hwang\*\*

**요 지 :** 본 연구의 목적은 시화호 점착성 퇴적물의 침강 및 침식특성을 정량적으로 분석하는 것이다. 침강특성은 특수 제작된 1.8 m의 침강수주를 이용하여 multi-depth 부유사 농도 채취방법으로 수행하였고, 침식특성은 전복대 환형수조를 이용하여 각기 다른 밀도를 갖는 균일저면 조건하에서 수행하였다. 침강실험의 결과로서, 시화호 점착성 퇴적물은 부유사 농도값이  $0.1 < C < 80$  g/L에서  $0.002 < W_s < 3.5$  mm/sec의 침강속도 값을 갖는 것으로 확인되었다. 또한, 침식실험의 결과로서 저면밀도를  $1.14 \sim 1.32$  g/cm<sup>3</sup>로 변화 시켰을때, 침식한계전단응력은  $0.19 \sim 0.55$  N/m<sup>2</sup>으로 증가하였으며, 침식률계수는  $18.4 \sim 3.9$  mg/cm<sup>2</sup>·hr의 범위로 감소하였다.

**핵심용어 :** 점착성 퇴적물, 침강실험, 침식실험, 부유사 농도, 침강수주, 환형수조

**Abstract :** The purpose of this study is to quantitatively estimate the settling and erosional properties for cohesive sediments in Shihwa lake. Settling tests are conducted by multi-depth method using a specially designed 1.8 m tall settling column, and erosion tests are conducted with annular flume under the uniform bed condition. As result of settling tests, it is confirmed that the settling velocity of the cohesive sediments has the range of  $0.002 < W_s < 3.5$  mm/sec for suspended sediments concentration of  $0.1 < C < 80$  g/L. Meanwhile, as result of erosion tests, it can be seen that the critical shear stress for erosion increases in the range of  $0.19 \sim 0.55$  N/m<sup>2</sup> for bed shear stress of  $1.14 \sim 1.32$  g/cm<sup>3</sup>, and the erosion rate coefficient decreases with logarithmic function in a range of  $18.4 \sim 3.9$  mg/cm<sup>2</sup>·hr with increase of bed shear stress.

**Keywords :** cohesive sediments, settling test, erosion test, settling column, annular flume

## 1. 서 론

우리나라는 국토의 2/3가 산지로 형성되어 있고 동고서저의 지형구조를 가지고 있는 관계로 구릉평야부를 형성하고 있는 연안을 배경으로 도시 및 산업이 발달하여 왔으며, 제4차 국토종합계획(2000~2020)에 의하면 해양 지향적 연안축의 개발을 통해 연안을 우리나라의 중심축으로 육성할 계획을 갖고 있어 신항만 건설 및 연안 매립등과 같은 해안지역의 대규모 개발공사가 이미 시행 되고 있으며, 더욱 가속화될 것으로 예상된다. 이에 따라 연안지역의 오염과 해저 지형 및 해양생태계의 변화 등에 의하여 환경적, 사

회적 그리고 경제적측면의 큰 문제에 직면하고 있는 실정이다.

수층 내의 중금속들과 유기 화학물들 같은 오염물질들은 퇴적물의 이송, 분산 및 퇴적에 의해 조절된다. 따라서 오염물질들의 화학적 작용들은 수층 부유사 농도와 침전된 퇴적물에 의해 강하게 영향을 받는다고 할 수 있다. 더욱이, 호수, 만, 하구 등에 널리 분포되어 있는 점착성 퇴적물의 경우에는 부유 혹은 용해상태의 여러 가지의 독성을 가진 오염물질과 쉽게 결합하는 경향이 있어, 호수 혹은 만에서의 수질 오염의 주요인이 된다. 따라서 수로 매몰, 해안 침식 등의 퇴적물 이송과 관련된 고질적인 문

\*전북대학교 토목공학과(Dept. of Civil Eng., Chonbuk National Univ., Jeonbuk 561-756, Korea)

\*\*전북대학교 토목공학과 · 공업기술연구센터(Corresponding author: Kyu-Nam Hwang, Dept. of Civil Eng. & RICT, Chonbuk National Univ., Jeonbuk 561-756, Korea. khwang@chonbuk.ac.kr)

제들뿐만 아니라 이러한 수질 오염과 관련된 문제들에서도 수층 부유사 농도 연직구조의 시간적 변동 해석을 위하여, 점착성 퇴적물의 제반 이송 특성에 대한 이해가 필수적으로 요구되고 있고, 점착성 퇴적물의 이동현상의 대표적 특성인 침강 및 침식특성에 대한 정량적·정성적 연구가 절실히 요구되고 있다(이현승, 2003; 황규남 등, 2005).

대부분의 경우에 호수 혹은 만에서의 점착성 퇴적물은 보통 무기성 광물과 유기물 및 생화학물의 혼합체이며, 광물 입자들은 주로 점토와 실트로 구성되어 있다. 이러한 혼합체의 침식·퇴적특성은 사질성 퇴적물과는 달리 입자간의 응집현상에 의해 크게 영향을 받으며, 응집강도는 광물 질 구성, 입경분포, 유기물 함량 등으로 묘사되는 퇴적물 자체의 물리·화학적 기본특성에 따라 크게 변화하고 (Mehta, 1986), 특히 저면 퇴적물의 침식 여부는 흐름 전단응력에 의한 저면 퇴적물의 저항력 즉, 저면전단강도의 상대적 크기의 차이에 좌우되므로, 그 침식 특성은 저면전단강도 혹은 저면밀도로 묘사되는 저면특성에 따라 크게 변화한다(황규남·소상돈, 2002). 또한 각 구역마다 저면 퇴적물은 퇴적물 공급원, 수동학적 조건, 생태학적 조건 등이 모두 다른 상태에서 형성된 퇴적층이므로, 저면 퇴적물의 기본특성 및 저면특성은 현장특성(site-specific)에 현저하게 의존한다(황규남 등, 2005).

본 연구에서는 시화호 점착성 퇴적물에 대한 침강·침식 특성의 산정을 목적으로 실내실험에 의하여, 표본시료의 물리·화학적 특성 및 해수의 특성을 기본적으로 조사하고, 침강·침식 매개변수에 대한 정량적 산정을 통하여 시화호 점착성 퇴적물에 대한 침강·침식특성을 평가하였다. 본 연구에서 도출된 결과를 타 지역에서 도출된 결과와 물리·화학적 특성과 연계하여 분석하였다. 또한 본 연구를 통하여 도출된 시화호 점착성 퇴적물의 침강·침식 매개변수에 대한 정량적 결과와 그 특성에 대한 정성적 분석 결과들은 향후 시화호에서의 풍파 혹은 순환류 등에 의한 수층 부유사 농도의 연직구조 변동 예측을 위한 수치모형 실험 시에 입력 자료로 사용될 수 있을 뿐만 아니라, 저면의 침식과 퇴적에 따른 하상변동 해석, 수질 및 퇴적물 오염 저감을 위한 대책방안 수립 등 다양한 목적으로 크게 활용될 수 있을 것이다.

## 2. 표본 시료의 채취와 해수의 특성

시화호 수역에서의 점착성 퇴적물의 물리·화학적 기본

특성, 침강특성 및 침식특성 조사를 위한 퇴적물 표본 시료는 Fig. 1에서 보인바와 같이 1개 정점(N: 37°19'18.4" E:126°40'43.4")에서 하계시(2003년 6월 26일)에 Grab sampler를 이용하여 채취되었다. 현장 해수의 조건을 반영하기 위하여 동일 지점에서 해수를 채수하였고 그 해수를 침강실험과 침식실험의 전 과정에서 사용하였다.

한편, 표층퇴적물 표본시료 및 해수 채취시의 수층조건을 파악하기 위하여, 퇴적물 표본시료가 채취되는 지점과 동일한 정점에서 동일시간에 수층의 염도, 수온 및 부유사 농도가 표층( $h_{2/10}$ ), 중층( $h_{6/10}$ ), 저층( $h_{8/10}$ )의 3개 수심에서 관측되었다. 퇴적물 표본시료 채취지점의 수심(h)은 1.7 m 이고, 채취당시의 각 층별 수온, 염도, pH 및 부유사 농도의 관측 값들은 수심평균 값들과 함께 Table 1에 주어진다. 수온, 염도 및 수심은 노르웨이 Aanderaa사의 S/T/D Sensor 3230을 사용하여 측정되었다.

## 3. 시화호 퇴적물의 물리·화학적 특성

채취된 표본 퇴적물 시료의 물리·화학적 특성 조사를 위해 본 연구에서는 입경 분포, 유기물 함량, 광물질 구성에 대한 3가지 실험을 수행하였으며 그 방법 및 결과들은 다음과 같다.

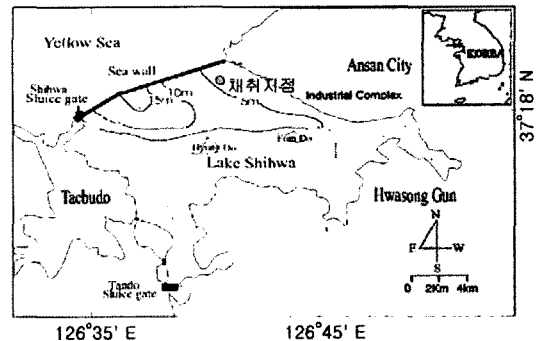


Fig. 1. Extraction location of sediment sample in Shihwa lake.

Table 1. Basic information of sea water used as an eroding fluid

관측수심	수온 (°C)	염분농도 (‰)	부유사농도 (mg/l)	pH
표층( $H_{2/10}$ )	22.5	27.7	7.5	8.34
중층( $H_{6/10}$ )	22.4	27.9	4.5	
저층( $H_{8/10}$ )	22.4	27.8	8.0	
수심평균	22.4	27.8	6.7	

3.1 입경분포

일반적으로 점착성 퇴적물의 입경분포는 체분석, 피펫법, 비중계 분석법 등을 통하여 결정되는데, 본 연구에서는 체 분석과 비중계 분석법을 병행하여 사용하였다. 순수 토사 입자만의 입경분포를 얻기 위하여, 본 실험에서는 시료 전처리 과정으로 4%의 NaPO<sub>3</sub>, 염산, 증류수를 사용하여 유기물과 flocc 형성을 촉진시키는 전해질 염분이 제거되었다. 또한, 단지 미세-점착성 퇴적물만의 입경분포를 구하기 위하여, No200체(75 μm)를 기준으로 습식 체질된 퇴적물에 대해 비중계 분석이 수행되었다. 실험을 통하여 산정된 시화호 퇴적물 표본시료에 대한 입경특성 및 입경분포 곡선이 타 지역에서의 결과들(천민철, 2003; 황규남 등, 2002; Hwang, 1989)과 함께 각각 Fig. 2와 Table 2에 주어진다. Fig. 2에서 보이는 바와 같이 시화호 퇴적물의 입경분포는 Okeechobee호와 군산 퇴적물보다 훨씬 더 조립의 분포를 가지며, 새만금 퇴적물과는 유사한 분포를 가지는 것으로 나타났다. 또한, 해양환경공정시험방법(국립수산진흥원, 1997)의 분류법에 따른 Table 2의 결과를 보면, 점토의 함량이 Okeechobee호 퇴적물의 경우에 32%이고, 군산 및 새

만금 해역의 경우에는 각각 13%와 11%에 달하지만, 시화호의 경우에는 5%정도로써 상대적으로 점토의 함량이 매우 적은 것으로 나타났다.

3.2 유기물 함량

본 연구에서 유기물 함량은 해양환경공정시험방법(국립수산진흥원, 1997)에 따른 강열감량법에 의해 조사되었다. 우선 채취된 표본시료들은 동결 건조 후에 곱게 분마되었으며, 곱게 분마된 시료 중 일정량(약 5 g)을 취하여 전기로에 넣고 550°C에서 약 2시간 동안 가열하였다. 유기물 함량의 퍼센티지(%)는 가열전의 시료무게와 가열후의 시료무게의 차이에 의해서 산정되었으며, 그 결과는 타 지역에서의 결과들(천민철, 2003; 황규남 등, 2002; Hwang, 1989)과 함께 Table 3에 주어진다. 시화호 퇴적물 시료에 대한 유기물 함량은 6%로 군산 및 새만금 해역 퇴적물과 유사하게 그 함량은 미미한 것으로 나타났으나, 유기물 함량이 40%인 Okeechobee호와는 약 7배 정도의 차이가 있음을 알 수 있다.

3.3 광물질 구성 성분

채취된 표본시료에 대한 광물질 구성성분 분석은 전북대학교 공동 시험소가 보유하고 있는 회절분석기(x-ray diffraction)를 이용하여 수행되었다. 본 연구에서는 광물질 구성성분의 정량적인 분석은 수행되지 않았으며, 정성적인 분석만이 수행되었고, 분석결과는 타 지역에서의 결과들(황규남 등, 2002; Choi, 1981; Hwang, 1989)과 함께 Table 4에 주어진다. 군산해역 퇴적물에 대한 Choi (1981)의 분석결과는 석영 및 장석 등을 제외한 순수 점토 광물만을 분석한 것으로서, 순수 점토 광물만을 고려한다면 시화호 퇴적물의 광물질 구성은 군산해역 퇴적물과 거의 비슷한 구성을 갖는다고 할 수 있고, 황규남 등(2002)에 의한 새만금 퇴적물 분석결과와는 거의 동일함을 알 수 있다. 한편, Okeechobee호 점착성 퇴적물의 광물질 구성성분(Hwang, 1989)은 시화호의 경우와는 달리 고령토가 지배적인 구성성분임을 알 수 있다.

Table 2. Comparison of grain size content for cohesive sediments

Site	sand(%) (d>62.5)	silt(%) (62.5>d>4)	clay(%) (d<4)
시화호	67	28	5
군산	22	65	13
새만금	61	28	11
Okeechobee호	-	68	32

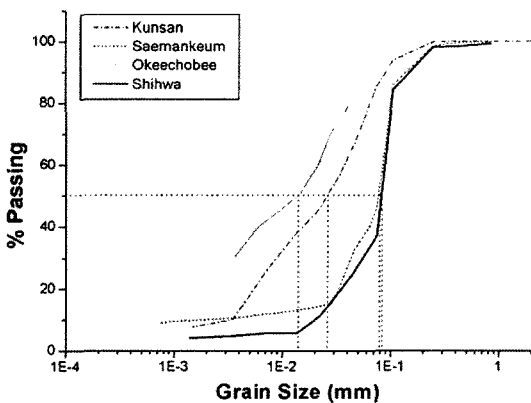


Fig. 2. Comparison of grain size distribution for cohesive sediments.

Table 3. Comparison of organism content for cohesive sediments

Site	유기물 함량(%)
시화호	6
군산	3
새만금	2
Okeechobee호	40

**Table 4.** Comparison of constituent component for mineral matters

함량순위	시화호	함량순위	군산	함량순위	새만금	함량순위	Okeechobee호
1	석영(Quartz)	1	Illite	1	Quartz	1	Kaolinite
2	미사장석(Albite)	2	Kaolinite	2	Feldspal, Albite		Montmorillonite
3	Illite	3	Chlorite	3	Illite	기타	Sepiolite
4	고령토(Kaolinite)	4	Smectite	4	Kaolinite		Quartz
	녹니석(Chlorite)			5	Chlorite		

#### 4. 침강실험 및 결과

##### 4.1 실험방법 및 조건

침강속도( $W_s$ )는 정지수면 조건하에서의 부유입자 혹은 플록(floc)의 하강속도로 정의되며, 보통 그 크기는 침강수주를 이용한 실험을 통하여 결정된다. 점착성 퇴적물의 침강속도는 부유사 농도( $C$ )의 함수로 주어지며, 침강에 대한 지배방정식은 1차원 질량보존 방정식으로 다음 식과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\frac{\partial(F_s)}{\partial z} = -\frac{\partial(W_s C)}{\partial z} \quad (1)$$

이 식은 부유사 농도,  $C(z,t)$ 의 시간적 변화율과 단위시간당 침강플럭스( $F_s$ )의 연직방향 변화율간의 관계를 나타낸다. 침강플럭스  $F_s$ 는 침강속도와 부유사 농도의 곱( $W_s C$ )으로 주어지며, 침강속도  $W_s$ 는 또한 연직방향 좌표  $z$ 의 함수이므로 미분 수행시에 어려움이 있다. 따라서 Ross (1988)가 개발한 각각의 수심과 시간에서의 부유사 침강속도산정을 위한 수치모형이 본 연구에서도 이용된다.

본 연구에서 응집침강(flocculated settling)과 간섭침강영역(hindered settling)에서의 침강속도 곡선식을 정량적으로 결정하기 위하여, 채취된 퇴적물 시료를 사용하여 서로 다른 초기농도( $C_0$ )에서 총 6회의 침강실험이 수행되었다. 침강실험은 특수 제작된 침강수주(settling column)를 이용하여 multi-depth 부유사 농도 채취방법으로 수행되었으며, 각 부유사 농도에서의 침강속도는 침강수주에서의 시간과 높이에 따른 농도변화 측정값들에 Ross(1988)가 개발한 침강속도 산정 수치프로그램을 적용하여 결정되었다. 침강수주의 단면도, 침강실험 과정 및 Ross(1988)의 수치모형을 이용한 침강속도 산정 방법 등에 대한 상세한 설명은 황규남(2000)과 천민철(2003)에 주어진다. 각 실험에서의 실험조건과 초기부유사 농도  $C_0$ 값은 Table 5에 주어진다.

##### 4.2 침강실험결과

중량분석을 통하여, 침강수주의 각기 다른 높이와 시간에서 채취한 탁수들의 부유사 농도가 측정되었고, 각 실험

**Table 5.** Experimental conditions in settling tests

지점	Test No.	Temp. of Suspension(°C)	$C_0$ (g/L)
	1	26.0~27.0	1.9
	2	27.0~27.5	5.4
시화호	3	26.0~26.5	8.2
	4	27.0	15.5
	5	26.0~26.5	17.9
	6	24.0~25.0	22.3

별로 농도 단면도가 작성되었다. 실험별로 작성된 총 6개의 농도단면도 중 대표적인 예가 Fig. 3에 보인다.

Fig. 3(a)는 저농도( $C_0=1.9$  g/L)의 경우로써, 부유사 농도가 전체 수주에서 점차적으로 감소하는 저농도에서의 침강형태를 잘 나타내고 있다. 그림에서 바닥면 근처에서 고농도층의 발달은 관찰되어지지 않고 있는데, 그 이유는 바닥면 근처에서 고농도 층이 발달은 하였으나 아주 빨리 발달되었고, 발달된 층의 높이가 제일 하단부에 있는 tap horse의 높이(5 cm)보다 아래에 위치한 때문이다. Fig. 3(b)는 중농도( $C_0=15.5$  g/L)의 경우로써, 2개의 명확한 경계면의 발달을 특징적으로 보여주고 있는데, 상부 경계면의 아래로는 부유사의 침강이 계속되나 경계면 위에서는 희석(thinning)이 발생하고 하부 경계면은 간섭침강의 발생과 더불어 연직방향 부유사 침강률이 감소하는 중농도의 침강형태를 잘 나타내고 있다. Ross (1988)에 따르면, 간섭침강(hindered settling)이라 불리는 고농도의 침강은 초기부유사 농도가 일반적으로 20 g/L보다 큰 경우에 발생하는 것으로 알려지고 있다. 고농도 침강의 경우, 부유사 농도가 증가함에 따라 부유사 침강률이 감소하는 특성을 가지는데 시화호 퇴적물의 경우에는 이러한 특성이 잘 나타나지 않고 있다. Fig. 4(c)는 고농도( $C_0=22.3$  g/L) 경우로 중농도 침강의 경우와 거의 구별이 되지 않는 형태임을 알 수 있는데 이는 시화호 퇴적물의 경우 간섭침강은 초기 부유사 농도가 30 g/L보다 더 클 때 발생하는 것으로 추정된다.

##### 4.3 침강속도 산정결과

침강속도는 Ross(1988)가 개발한 침강속도 산정을 위한

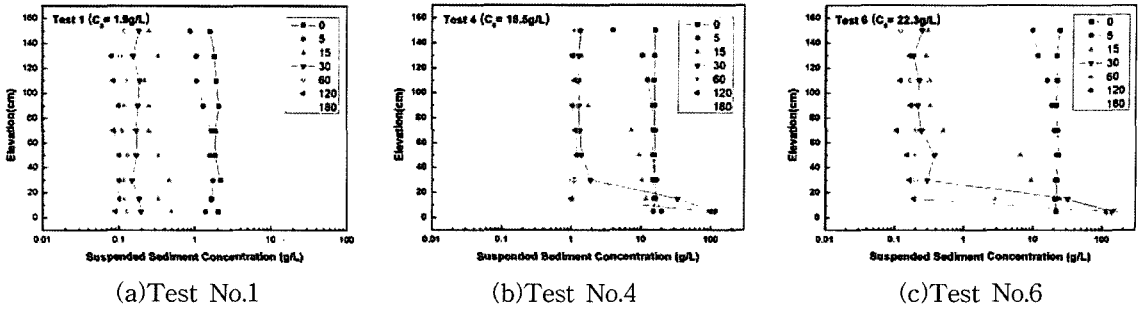


Fig. 3. Concentration profiles for suspended sediments.

수치모형에 총 6회의 실험으로부터 구한 농도단면도들로부터 침강수주 각각의 높이와 시간에 측정된 탁수의 농도 값들이 입력되어 산정되었다. 산정결과는 접합곡선의 각 인자값 및 접합곡선의 결정계수  $R^2$ 과 함께 Fig. 4에 주어진다. 그림에 제시된 상관계수  $R_s^2$ 은 응집침강영역의 접합곡선에 대한 값이며,  $R_b^2$ 은 간섭침강영역의 접합곡선에 대한 값이다. 데이터가 다소 분산되어 있기는 하나, Fig. 4는 부유사 농도가 증가함에 따라 침강속도가 증가하는 응집침강영역( $0.1 < C < 10$  g/L)과, 역으로 침강속도가 감소하는 간섭침강영역( $10 < C < 90$  g/L)을 명확히 보여주고 있다.

응집침강영역에서의 침강속도 분포곡선의 일반적 표현식은 부유사 농도의 함수로써 다음과 같이 주어진다.

$$W_s = k_1 C^a \quad (2)$$

침강속도 곡선식을 도출하기 위하여 식 (2)의 적용과 더불어 최소자승법을 통하여 산정한  $a$ 와  $k_1$ 은 그림에 주어

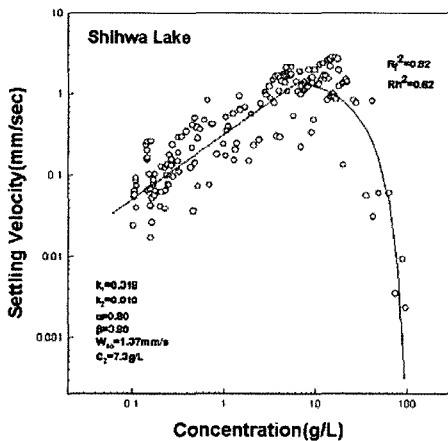


Fig. 4. Settling velocity variation with concentration of suspended sediments.

진 것처럼 시화호 퇴적물 시료의 경우에 각각 0.80과 0.318의 값을 갖는 것으로 나타났다. 간섭침강 영역에서의 침강속도는 일반적으로 다음 식 (3)과 같이 주어지며 최소자승법으로 구한  $W_{s0}$ ,  $C_2$ ,  $k_2$  및  $\beta$ 값은 각각 1.37, 7.3, 0.010 및 3.80인 것으로 나타났다.

$$W_s = W_{s0} [1 - k_2 (C - C_2)]^\beta \quad (3)$$

침강실험의 결과로서, 시화호 점착성 퇴적물은 부유사 농도값이  $0.1 < C < 80$  g/L에서  $0.002 < W_s < 3.5$  mm/sec의 침강속도 값을 갖는 것으로 확인되었다.

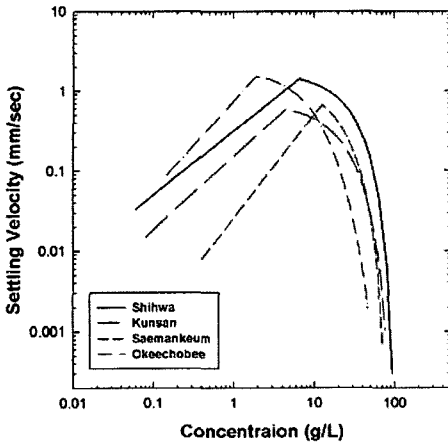
#### 4.4 타 지역 퇴적물과의 침강특성 비교

침강속도 특성의 지역적 변화 및 원인을 분석하고자 타 지역(천민철, 2003; 황규남 등, 2002; Hwang, 1989)의 결과들과 퇴적물 자체의 물리·화학적 특성과 연계하여 정성적으로 비교·분석하였다. 퇴적물의 물리·화학적 특성 비교는 Table 6에 주어지며, 퇴적물의 침강속도 곡선은 Fig. 5에서 비교된다.

일반적으로 점착성 퇴적물은 평균입경이 작을수록, 그리고 유기물 함량이 클수록 점착력이 증가하는 경향이 있으며, 또한 광물학적 측면에서 보면, 보편적으로 점착성 퇴적물에 많이 함유되어 있는 고령토, Illite, 녹니석 등의 광물성 점토보다 석영은 훨씬 작은 점착력을 갖는다. 따라서 Okcechobee호 퇴적물보다 상대적으로 평균입경이 크고 유기물함량이 작으며, 점착력이 비교적 작은 석영을 주성분으로 하는 시화호 퇴적물은 점착력에 의한 침강효과보다는 중력에 의한 침강효과가 Okcechobee호 퇴적물의 경우보다 상대적으로 더 클 것으로 판단된다. 이러한 해석은 응집침강 영역과 간섭침강 영역에서의 두 퇴적물의 침강속도 크기를 정량적으로 비교할 때에 그 타당성을 갖는다. 퇴

**Table 6.** Comparison of physical and chemical properties for cohesive sediments

특성 항목	시화호	군산해역(2003)	새만금해역(2001)	Okeechobee호(1989)
평균입경(μm)	74	32	52	15
광물질 주성분	석영	석영	석영	고령토
유기물 함량(%)	6	3	2	40



**Fig. 5.** Comparison of settling velocity for cohesive sediments.

적물의 점착력이 크다는 것은 부유토사 입자간의 응집력이 크다는 것을 의미하므로, 응집 효과에 의한 침강속도의 증가가 지배적인 응집침강 영역에서 상대적으로 점착력이 작고 중력의 효과가 큰 시화호 퇴적물은 Okeechobee호 퇴적물의 침강속도보다 작은 침강속도를 갖게 되었다고 해석할 수 있다(Fig. 5). 반면에 고농도시에 토사 입자간의 응집효과가 침강속도를 감소시키는 간섭침강 영역에서는 점착력이 더 큰 Okeechobee호 퇴적물이 시화호 퇴적물보다 작은 침강속도를 갖는 결과가 초래되었다고 설명될 수 있다.

시화호 퇴적물의 침강속도는 응집침강 영역에서는 군산 및 새만금 해역 퇴적물보다는 크고, Okeechobee호 퇴적물의 침강속도보다는 작은 값을 가지다가, 간섭침강영역의 초기부분에서부터 Okeechobee호 퇴적물의 침강속도보다 크게 나타났으며 부유사 농도가 40 g/L이상인 고농도영역에서는 군산 및 새만금 해역 퇴적물보다 평균 5배 정도 크게 나타났다. 이러한 결과는 물리·화학적 특성 중 평균입경에서 시화호 퇴적물의 평균입경이 군산 및 새만금 해역, 그리고 Okeechobee호 퇴적물보다 크므로, 이론적으로 타당한 결과라 할 수 있다. 유기물 함량 및 광물질 구성 성분에서는 시화호와 새만금 및 군산해역 퇴적물의 유기물 함량과 주요 광물질 구성 성분이 거의 동일한 것으로 비추어, 물리·화학적 특성 중 입경분포가 침강속도에 미

치는 영향이 유기물 함량과 광물질 구성성분보다는 더 큰 것으로 확인되었다.

### 5. 침식특성 실험 및 결과

#### 5.1 실험 방법 및 조건

본 연구에서는 시화호 점착성 퇴적물의 침식특성 조사를 위해 황규남·소상돈(2002)에 의해 국내 최초로 제작된 전북대 환형수조를 이용하여 침식실험을 수행하였다. 일반적으로 침식 실험시에 조성되는 저면의 종류는 균일저면과 퇴적저면으로 분류되는데, 본 연구에서는 균일저면이 사용되었다. 균일저면의 형성 여부는 특수 제작된 저면밀도 측정장치를 이용하여 확인되었다. 이 장치를 이용한 자세한 저면밀도 측정방법과 침식실험방법은 황규남 등(2005)에 의해 상세하게 주어진다. 한편, 본 연구의 목적은 시화호 점착성 퇴적물의 침식특성 조사이므로, 시화호에서 채취된 퇴적물 표본시료는 No.200제로 우선 습식 체질 되었으며, 이로부터 얻어진 입경 75 μm이하의 미세 퇴적물만을 사용하여 저면이 형성되었다. 본 침식실험에서는 저면밀도를 1.32 g/cm<sup>3</sup>에서 1.14 g/cm<sup>3</sup>까지 변화시키며 총 7회에 걸쳐 침식실험이 수행되었다. 저면두께와 수심은 각각 5 cm와 10 cm로 모든 실험에 동일하게 적용되었고, 전단응력의 변화는 각 실험에 대하여 동일하게 0.1N/m<sup>2</sup>씩 5~6단계에 걸쳐 증가시켰으며 각 실험별 침식실험 조건은 Table 7과 같다.

#### 5.2 침식실험 결과

일반적으로 균일저면에 대한 침식률( $\epsilon$ )은 다음과 같이 표현된다(Ariathurai and Arulanandan, 1978).

$$\epsilon = \frac{dm}{dt} = \epsilon_{M,s} \left( \frac{\tau_b}{\tau_{ce,s}} - 1 \right) \quad (4)$$

여기서  $\epsilon_{M,s}$  는 침식률 계수이며,  $\tau_b$  는 흐름에 의한 저면전단응력이다. 한편, 본 침식실험에서 각각의 주어진 저면전단응력에 대한 침식률은 단위 면적 당 침식된 유사질량의 시간변화율을 전체 깊이(수심)에서의 부유사 농도의 시간변화율로 변환시킴으로써 다음과 같이 표현되어질 수 있다.

**Table 7.** Experimental conditions in erosion tests

Test No.	$\rho_B$ (g/cm <sup>3</sup> )	수심 (cm)	저면두께 (cm)	초기 전단응력 (N/m <sup>2</sup> )	최종 전단응력 (N/m <sup>2</sup> )	침식수의 수온 (°C)
1	1.32	10	5	0.1	0.7	24-25
2	1.29	10	5	0.1	0.7	25-26
3	1.26	10	5	0.1	0.6	25-26
4	1.23	10	5	0.1	0.5	25-26
5	1.20	10	5	0.1	0.6	24-25
6	1.17	10	5	0.1	0.4	23-24
7	1.14	10	5	0.1	0.3	23-24

$$\epsilon = \frac{dm}{dt} = h \frac{\partial C}{\partial t} \quad (5)$$

여기서  $m$ 은 단위 저면표면적당 침식된 유사량, 그리고  $h$ 는 수심을 나타낸다.

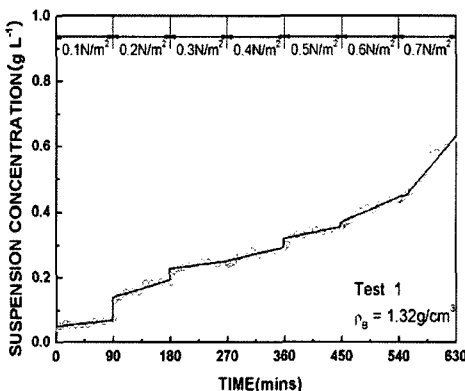
식 (4)와 (5)를 이용하여 저면전단응력과 침식률간의 관계곡선이 우선적으로 도출되며, 이로부터 표면침식(surface erosion) 단계에서 침식한계전단응력( $\tau_{ce,s}$ )과 침식률계수( $\epsilon_{M,s}$ )값이 산정된다. 상세한 설명은 황규남 등(2005)에 주어졌다.

Fig. 6(a)는 시간에 따른 부유사 농도변화에 대한 한 예 (Test No.1)를 나타내며, 균일저면의 조건하에서 침식이 진행되는 동안 수조내의 부유사 농도가 시간에 따라 선형적으로 증가하는 현상을 잘 보여주고 있다. 한편, Fig. 6(b)는 침식한계전단응력( $\tau_{ce,s}$ ) 및 침식률계수( $\epsilon_{M,s}$ )의 산정을 위하여 저면전단응력에 대한 침식률 데이터로부터 도출된 침식률 곡선이며, 한 예(Test No.1)를 보이고 있다. 그림에서 2개의 접합곡선  $\epsilon_1$ 과  $\epsilon_2$ 가 산정되었는데 여기서, 접합곡선  $\epsilon_1$ 은 작은 저면전단응력에서의 상부의 교란된 일부 퇴적저면(fluff)의 침식을 나타내고, 접합곡선  $\epsilon_2$ 는 상대적으로 큰

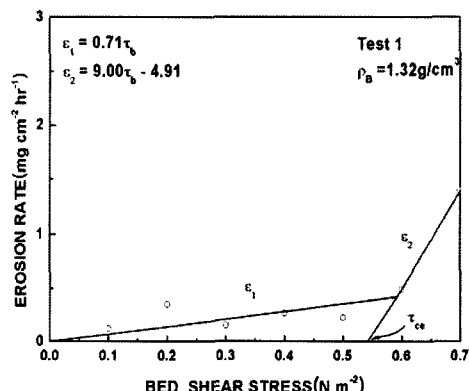
저면전단응력에서의 표면침식을 나타낸다. fluff 침식으로 인한 상부의 일부 퇴적저면에서 침식된 유사량은 실제로 그다지 크지 않고, 또한 본 연구의 목적이 표면침식특성에 관한 연구이므로 fluff 침식은 본 분석에서 무시되었다. 침식한계전단응력( $\tau_{ce,s}$ ) 및 침식률계수( $\epsilon_{M,s}$ )는 Shields(1936)가 제시한 방법에 따라, 표면침식에 대한  $\tau_{ce,s}$ 는 접합곡선  $\epsilon_2$ 를 횡좌표 축까지 외삽시켜 구해지며,  $\epsilon_{M,s}$ 는 접합곡선  $\epsilon_2$ 의 기울기와  $\tau_{ce,s}$ 를 곱하여 얻어진다. 침식실험의 결과로서 저면밀도를 1.14~1.32 g/cm<sup>3</sup>로 변화시켰을때, 침식한계전단응력은 0.19~0.55N/m<sup>2</sup>로 증가하였으며, 침식률계수는 18.4~3.9 mg/cm<sup>2</sup>·hr의 범위로 감소함을 알 수 있었다.

**5.3 저면밀도가 침식매개변수들에 미치는영향**

저면밀도  $\rho_B$ 가 점착성 퇴적물의 침식특성을 나타내는 두 매개변수  $\tau_{ce,s}$ 와  $\epsilon_{M,s}$ 에 미치는 영향을 알아보기 위하여 각 매개변수와  $\rho_B$ 간의 관계가 조사되었으며, 그 결과는 각각 Fig. 7에 주어진다. 그림들로부터 두 매개변수  $\tau_{ce,s}$ 와  $\epsilon_{M,s}$ 가 각각 저면밀도  $\rho_B$ 와 상관성이 매우 크며, 일반적으로  $\rho_B$ 가 증가할 때,  $\tau_{ce,s}$ 는 증가하는 반면에  $\epsilon_{M,s}$ 는 감소



(a) Time-concentration variation



(b) Erosion rate variation with bed shear stress

**Fig. 6.** An example of results for erosion tests.

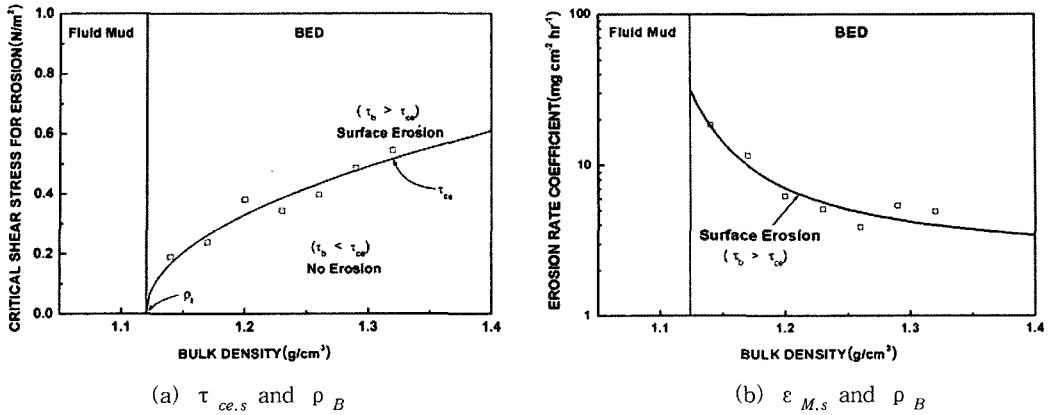


Fig. 7. Variation of critical shear stress( $\tau_{ce,s}$ ) and erosion rate coefficient( $\epsilon_{M,s}$ ) with bed bulk density( $\rho_B$ ).

하는 경향이 있음을 알 수 있다(황규남·소상돈(2002)과 황규남 등(2005)참조).

5.4 타 지역 점착성 퇴적물의 침식 매개변수와의 비교

본 연구를 통하여 산정된 시화호 점착성 퇴적물의 침식 특성( $\tau_{ce,s}$  와  $\epsilon_{M,s}$ ) 측정결과와 과거 타 지역 퇴적물에 대한 침식특성 실험결과의 비교·검토를 통하여, 점착성 퇴적물의 침식특성의 지역적 변화에 대한 정성적 분석이 수행되었으며, 미국 Okeechobee호(Hwang, 1989), 군산해역 (이현승, 2003) 및 고령토(황규남 등, 2005) 점착성 퇴적물들에 대한 침식특성 산정 결과와의 비교가 Fig. 8에 주어진다.

Fig. 8(a)에서 각 퇴적물에 대하여 산정된 침식한계전단응력 곡선들이 주어진 저면밀도 값에 대해 정량적으로 상당히 다른 침식한계전단응력 값을 갖는다는 것을 알 수 있

다. 전체적으로 시화호 퇴적물의 침식한계전단응력은 군산해역과 고령토 퇴적물보다는 큰 값을 갖고, Okeechobee호 퇴적물보다는 작은 값을 가진다. 각 지역마다 침식 매개변수값( $\tau_{ce,s}$ ,  $\epsilon_{M,s}$ ,  $\rho$ )이 정량적으로 큰 차이를 보이는 것은 퇴적물의 물리·화학적 특성의 지역적 차이에서 비롯된 것으로 추정된다. 각 지역의 퇴적물에 대한 물리·화학적 특성은 Table 6에 이미 주어졌다.

점착성 퇴적물은 유기물 함량이 클수록, 평균입경이 작을수록, 그리고 광물질 구성성분에 고령토, Illite가 많이 포함되어 있을수록 점착력이 증가한다. 따라서 Okeechobee호 퇴적물보다 상대적으로 평균입경이 크고 유기물 함량이 작으며, 점착력이 비교적 작은 석영을 주성분으로 하는 시화호 퇴적물은 Okeechobee호 퇴적물보다 작은 점착력을 가질 것이다. 동일한 저면 밀도에서 저면 퇴적물의 점착력이

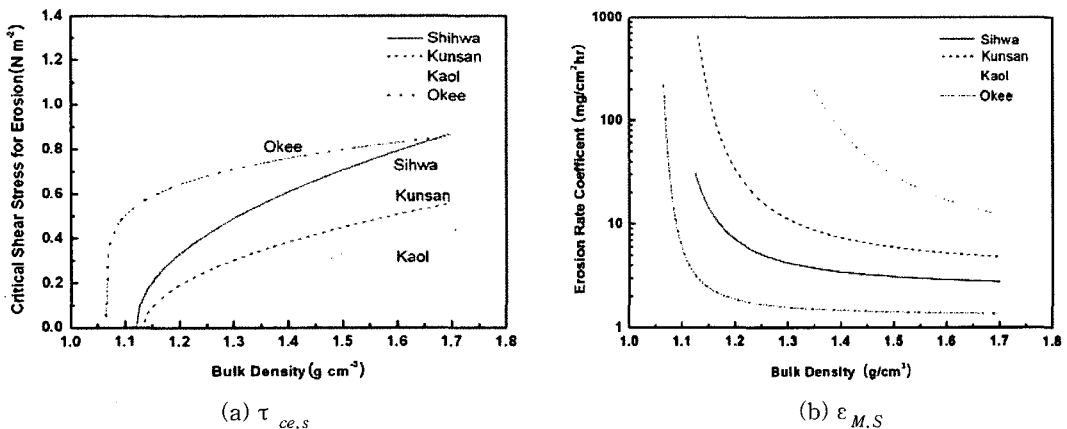


Fig. 8. Comparison of  $\tau_{ce,s}$  and  $\epsilon_{M,s}$  between the previous studies and present one.



강할수록 침식한계전단응력은 커지게 되므로 시화호와 Okeechobee호 퇴적물의 침식한계전단응력값의 정량적 차이는 이러한 점착력의 차이에서 비롯되었다고 해석 할 수 있다. 반면에 시화호 퇴적물은 군산해역 퇴적물에 비하여 입경이 약 2배정도 크고 유기물은 약 2배정도 더 많이 함유되어 있는데, 이 두가지 요소만으로는 두 퇴적물간의 침식한계전단응력의 차이를 설명하는 것은 불가능한 것으로 여겨진다. 한편, 고령토(황규남 등, 2005)의 경우에 가장 작은 침식한계전단응력값을 갖는데, 이는 침식수의 특성에 기인하는 것으로 추정된다. 고령토의 침식실험에서는 침식수로서 염분이 전혀 없는 수돗물이 사용되었다. 침식수의 염분 농도가 높을수록 퇴적물의 점착력이 증가되어, 침식한계전단응력은 증가하고 침식률은 감소하게 된다는 점을 고려할 때, 이러한 해석은 타당성을 갖는다.

각 퇴적물에 대하여 산정된 침식률계수 곡선들의 비교는 Fig. 8(b)에 주어진다. 결과로부터 침식한계전단응력과 마찬가지로 침식률계수 또한 주어진 저면밀도 값에 대해 정량적으로 매우 다른 값을 갖는 것을 명확히 알 수 있는데, 이러한 침식률계수값의 정량적 차이도 앞에서 침식한계전단응력의 비교·검토시에 적용된 해석과 동일하게 해석될 수 있다.

최근 황규남·소상돈(2002), 이현승(2003), 황규남 등(2005)에 의해 보고된 바와 같이 정량적인 측면에서의 침식특성 매개변수 값의 현저한 차이가 의미하는 바는 미세·점착성 퇴적물의 경우에 그 침식특성은 침강특성과 마찬가지로 퇴적물 자체의 물리·화학적 기본특성에 따라 지역적으로 크게 변화 할 수 있다는 것이다. 이러한 사실은 타 지역 퇴적물의 침식특성 관측자료는 특정지역에서의 점착성 퇴적물의 이동예측을 위한 수치모형실험을 위해 사용될 수 없다는 것을 나타내며, 침식특성 매개변수 산출을 위한 현장 관측이나 실내실험이 각 조사대상 지역마다 별도로 수행될 필요가 있다는 것을 의미한다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 시화호 점착성 퇴적물의 침강·침식특성에 대한 정량적 조사를 목적으로 실내실험을 통하여 채취된 시료의 물리·화학적 특성 및 해수의 특성과 연계하여 침강 및 침식특성을 조사하였고, 기존의 타 지역에서의 결과와 비교·검토하였다. 시화호 점착성 퇴적물에 대한 침강속도 산정결과는 부유사 농도가 증가함에 따라 침강속도가 증가하는 응집침강영역( $0.1 < C < 10$  g/L)과 역으로 침강속도가 감소하는 간섭침강영역( $10 < C < 90$  g/L)이 명확히 나타

남을 보여주었다. 침강속도는 모든 퇴적물 시료에 대해 부유사 농도값이  $0.1 < C < 80$  g/L에서  $0.002 < W_s < 3.5$  mm/sec 사이의 침강속도 값을 갖는 것으로 나타났다. 시화호 퇴적물의 침강속도는 응집침강 영역에서는 군산 및 새만금 해역 퇴적물보다는 크고, Okeechobee호 퇴적물의 침강속도보다는 작은 값을 가지다가, 간섭침강영역의 초기부분에서부터 Okeechobee호 퇴적물의 침강속도보다 크게 나타났으며 부유사 농도가 40 g/L이상인 고농도영역에서는 군산 및 새만금 해역 퇴적물보다 평균 5배 정도 크게 나타났다.

시화호 점착성 퇴적물에 대한 침식특성 산정결과는 침식한계전단응력( $\tau_{ce,s}$ )과 침식률계수( $\epsilon_{M,s}$ )가 각각 저면밀도( $\rho_B$ )와 큰 상관성을 갖고 있음을 명확히 보여주었으며, 일반적으로  $\rho_B$ 가 증가할 때,  $\tau_{ce,s}$ 는 증가하나 반면에  $\epsilon_{M,s}$ 는 감소하는 것으로 나타났다. 저면밀도를 1.14~1.32 g/cm<sup>3</sup>로 변화시켰을 때 침식한계전단응력은 0.19~0.55 N/m<sup>2</sup>의 범위로 증가하였으며, 침식률 계수는 밀도가 증가함에 따라 18.4~3.9 mg/cm<sup>2</sup>·hr의 범위로 감소하는 경향을 보였다. 대체적으로 시화호 퇴적물의 침식한계전단응력은 군산해역과 고령토 퇴적물보다는 큰 값을 갖고, Okeechobee호 퇴적물보다는 작은 값을 갖는 것으로 나타났다. 반면에, 시화호 퇴적물의 침식률계수는 군산해역 및 고령토 퇴적물보다 작은 값을 가지며, Okeechobee호 퇴적물보다는 큰 값을 갖는 것으로 나타났다. 이러한 결과들로부터, 침식특성 또한 지역적으로 현저한 차이가 있음이 확인되었다.

본 연구를 통하여 도출된 시화호 점착성 퇴적물의 침강·침식 매개변수에 대한 정량적 결과와 그 특성에 대한 정성적 분석 결과들은 향후 시화호에서의 풍파 혹은 순환류 등에 의한 수층 부유사 농도의 연직구조 변동 예측을 위한 수치모형 실험 시에 입력 자료로 사용될 수 있을 뿐만 아니라, 저면의 침식과 퇴적에 따른 하상변동 해석, 수질 및 퇴적물 오염 저감을 위한 대책방안 수립 등 다양한 목적으로 크게 활용될 수 있을 것이다. 점착성 퇴적물의 침강·침식 특성은 현장특성(site-specific)에 현저하게 의존하는 특성을 가지므로, 황규남(2000), 이현승(2003), 천민철(2003) 등에 의해 강조된 바와 같이 해당 지역 퇴적물에 대한 침강·침식특성 매개변수 산출을 위해서는 현장 관측이나 실내실험이 각 조사대상 지역에서 반복적으로 수행되어야 한다.

## 감사의 글

본 연구는 전북대학교 부설 공학연구원 공업기술연구센터의 지원에 의해 수행되었습니다.

## 참고문헌

- 박용철 (1997). 해양환경공정시험방법. 한국해양학회, 국립수산진흥원.
- 이재연 (2001). 새만금 해역 갯벌 퇴적물의 침강 특성에 관한 연구. 석사학위논문, 전북대학교.
- 이현승 (2003). 군산해역 점착성 퇴적물의 침식특성에 관한 연구. 석사학위논문, 전북대학교.
- 천민철 (2003). 군산해역 미세-점착성 퇴적물의 침강특성에 관한 연구. 석사학위논문, 전북대학교.
- 황규남 (2000). 새만금 갯벌퇴적물의 침강속도 산정을 위한 실험적 연구. 대한토목학회논문집, 20(2-B), 277-286.
- 황규남, 소상돈 (2002). 환형수조를 이용한 미세-점착성 퇴적물의 침식특성 조사. 한국 수자원학회 학술발표회 논문집(II), 1075-1080.
- 황규남, 조용식, 이태환 (2002). 새만금 미세점착성 퇴적물의 침강특성 : 퇴적물의 물리·화학적 특성의 영향. 한국수자원학회지, 35(5), 475-484.
- 황규남, 소상돈, 김태민 (2005). 미세-점착성 퇴적물의 침식률 산정을 위한 실험적 연구. 한국해양해양공학학회지, 17(2), 119-128.
- Ariathurai, R. and Arulanandan, K. (1978) Erosion rates of cohesive soils. J. Hyd. Div., ASCE. 104, HY2, 279-283.
- Choi, J.H. (1981). Recent clay minerals in the Kunsan estuary and the adjacent continental shelf. M. Sc. Thesis, Dept. of Oceanography, S.N.U.
- Hwang, K.-N. (1989). Erodibility of fine sediment in wave-dominated environments. Master's Thesis, University of Florida.
- Mehta, A.J. (1986). Characterization of cohesive sediment properties and transport processes in estuaries, Estuarine Cohesive Sediment Dynamics. A.J. Mehta ed., Springer-Verlag, Berlin, 290-325.
- Ross, M.A. (1988). Cohesive sediments in estuarine environment. Ph.D. Dissertation, Univ. of Florida, Gainesville, FL.
- Shields A. (1936). Anwendung der Ähnlichkeitsmechanik und Turbulenzforschung auf die Geschiebepbewegung. Mitteil. Preuss. Versuchsanst. Wasser Erd. Schiffbau, Berlin, No. 2.

---

Received June 22, 2006

Accepted August 10, 2006