

## 미세-점착성 퇴적물의 침강 속도와 부유사 농도의 관계 Relationship between the Settling Velocity and the Suspended Sediment Concentration for Fine-Grained Cohesive Sediments

황규남\* · 이태환\*

### 1. 서론

연안매립 및 신항만 건설, 해안선 정비사업 등과 같은 대규모 공사는 인근 해역에서의 해수유동의 변화와 해수의 혼탁도 증가 및 퇴적물의 침식과 퇴적에 의한 해저 지형의 변형을 초래하고, 이로 인해 기존 항로의 매물과 해양생물 생태계 변화 등과 같은 문제점을 유발한다는 것은 잘 알려진 사실이다. 특히 한국의 서해연안 대부분과 남해연안 일부에 분포되어 있는 미세-점착성 퇴적물은 사질성 퇴적물과는 달리 퇴적물에서 부유된 토사 입자의 침강 속도가 아주 작아서, 파랑과 조류 등과 같은 해수유동에 의해 쉽게 이동되어 현저한 해저 지형의 변형을 초래한다. 또한 토사 입자가 지닌 점착성으로 인하여, 부유된 각각의 토사는 연안 해역에 유입된 여러 가지의 독성을 가진 오염 물질과 쉽게 결합되고 해저면에 퇴적되어 港内の 해수 오염의 주된 원인으로 평가된다 (Hwang and Mehta, 1989).

연안에서의 기본 공사계획 시 이러한 발생 가능한 문제점들의 사전 점검 및 대책 수립을 위해 해수유동에 의한 수평 및 연직 방향에서의 해저 퇴적물의 퇴적과 침식 및 부유사 농도 분포도에 대한 예측은 필수적인 요소이다. 연안에서의 미세-점착성 퇴적물의 제반 이동 현상은 퇴적물 간의 점착성으로 인하여 침강 및 침식, 퇴적 현상이 매우 복잡하여 이에 대한 완전한 해석이 아직 충분하지 못한 실정이나, 그동안 예측모형의 개발을 위해 많은 연구가 진행되어져 왔다. 예측모형에 대한 국내에서의 연구개발 상황은 외국에 비해 아직도 초기 단계를 벗어나지 못하고 있으며, 주로 외국의 예측모형을 검증과 수정 없이 국내에 적용하고 있는 실정이다 (과학기술처, 1991). 현재 외국에서 개발된 예측모형들로서는 E.J. Hayter의 CSTM-H 모델 (USA), Y.P. Sheng의 EHSM3D 모델 (USA)과, SOGREAH社 (France), DHI (Danish Hydraulic Institute)의 모델들이 언급되고 있는데, 이러한 모형들은 해수유동에 의한 연직 방향에서의 부유사 농도 분포도 변화 예측을 위해 공통적으로 여러 가지의 실험실 실험과 현장 관측에서 얻어진 경험식들을 활용하고 있다.

미세-점착성 퇴적물의 연직방향 이동 현상은 기본적으로 해저면에서의 침식과 퇴적 및 압밀, 해수층에서의 토사의 침강과 확산으로 구성되며, 언급된 예측모형들은 이러한 각각의 현상들을 주로 실험식에 근거하여 묘사하고 있다. 여기서 인식해야 할 중요한 사항은 이러한 경험식들은 아직 일반화가 되어 있지 않다는 것이다. 예를 들어 사질성 퇴적물인 경우에 퇴적물의 침식과 침강은 단순히 토사 입자의 크기로 묘사될 수 있는

\* 주식회사 대우건설

organics), 광물질 구성 (mineralogical composition), 양이온 전도율 (cation exchange capacity)로 묘사되는 물리-화학적 (physico-chemical) 특성에 따라 변화되기 때문에 (Mehta, 1986), 예측모형에 사용되는 경험식들의 일반화는 아직 요원한 실정이다. 이러한 이유로 미세-점착성 퇴적물의 이동 예측모형에서 사용되는 실험식들은 모형을 적용할 현장에서의 해저 퇴적물의 특성에 맞게 사전에 검증되고 수정되어야 한다.

미세-점착성 퇴적물의 이동 예측모형에 사용되는 실험식들의 검증을 위해 필수적으로 수행하는 실험실 실험들로서는 침식실험, 퇴적 및 압밀실험, 침강실험 등이 있는데, 본 논문에서는 침강에 대한 기존 연구 결과의 간단한 검토와, 미국 플로리다주에 위치한 Okeechobee 호수 저부의 미세-점착성 퇴적물을 이용하여 실험실에서 수행된 침강실험의 결과를 제시하고자 한다. 이 침강실험을 통해 산정된 침강 실험식에 근거하여, 황(1995)은 Ross(1988)의 미세-점착성 퇴적물 연직이동 예측모형을 수정한 후, Okeechobee 호수에 적용하여 현장 측정치에 부합되는 호수에서의 부유사 농도 분포도와 침식 가능한 저부의 깊이를 예측한 바 있다.

## 2. 미세-점착성 퇴적물의 침강 속도에 관한 기존 연구 결과의 검토

그림 1에 도식된 것 처럼 미세-점착성 퇴적물의 침강 속도,  $W_s$ ,는 토사 입경의 함수가 아니라 부유사 농도,  $C$ 의 함수이다 (Mehta, 1988). 침강 속도의 영역은 부유토사의 농도에 따라 간단히 3개의 영역인 자유침강 (free settling), 응집침강 (flocculation settling), 그리고 간섭침강 (hindered settling)으로 분류된다 (Hwang, 1989).

자유침강은 그림 1에 표시된 것 처럼 부유사 농도  $C$ 가  $C_1$ 보다 작은 영역에서 발생한다. 이 영역에서 토사 입자 혹은 (입자들이 결합된 상태인) 토사 덩어리 (aggregates)들은 입자들간의 상호 충돌 등에 의한 간섭과 방해 없이 독립적으로 침강하며, 침강 속도는 부유사 농도와 전혀 관계가 없다. 응집침강 영역으로 분류되는 부유사 농도  $C_1$ 과  $C_2$  사이에서는, 농도가 증가할수록 토사 입자간의 충돌이 증가하고 이로 인하여 입자간의 응집 현상이 증가한다. 다시 말해서 이 영역에서는 농도가 증가할수록 더 밀집되고 더 커진 토사 덩어리가 형성되어 결과적으로 침강 속도는 농도와 함께 증가하게 된다. 부유사 농도가  $C_2$  보다 큰 경우에는 고농도의 상태로, 토사 덩어리들이 network를 형성하여 공극수 (interstitial water)의 상승 이동을 방해한다. 결과적으로 그림 1에 도식된 것 처럼  $C$ 가 증가 할수록  $W_s$ 는 감소한다 (Kynch, 1952). 이 영역에서의 침강을 간섭침강이라 한다.

## 3. 미세-점착성 퇴적물 침강실험의 개요

Okeechobee 호수의 퇴적물을 사용하여 미세-점착성 퇴적물의 침강 속도와 부유 농도의 관계식을 결정하기 위한 실험실 실험이 수행되었다. 미국 플로리다주에서 가장 큰 호수인 Okeechobee 호수는 주위 지역에서 유입되는 인 (phosphorus)의 양적인 증가로 인하여 전형적인 인위적 부영양화 (eutrophication)의 한 예를 보여주고 있다. 그림 2에 보여진 것 처럼 표본 퇴적물은 호수 내의 6개의 지점에서 봄과 가을 두 차례에 걸쳐 채취 되었다. 침강실험은 플로리다 대학의 해안공학 실험실에서 특별히 설계된 2 m 높이 원형 모양의 침강 수주 (column)에서 수행되었다. 수주는 Lott (1987)에 의해 처음 설계되었다. 수주의 형상은 그림 3에 도식되어 있다. 총 14번의 침강 속도 실험이 성공적으로 수행되었고 각 실험의 초기조건들은 표 1에 주어진 바와 같다.

Table 1. Settling Test Conditions.

Test No.	Location of Mud Sample	Date of Mud Collection	Temp. of Suspension (T°C)	C <sub>0</sub> (g/L)
1	site 1	Mar 1 1988	27.4 - @	1.8
2	site 2	Mar 1 1988	29.0 - 32.0	2.8
3	site 2	Mar 1 1988	26.3 - @	14.1
4	site 3	Mar 1 1988	@	5.0
5	site 4	Mar 1 1988	27.0 - @	2.8
6	site 4	Mar 1 1988	25.5 - @	23.7
7	site 5	Mar 1 1988	28.7 - 30.8	2.7
8	site 6	Oct 28 1988	19.0 - 20.9	3.2
9	site 6	Oct 28 1988	19.6 - 22.3	6.5
10	site 6	Oct 28 1988	19.4 - 20.6	13.6
11	site 6	Oct 28 1988	21.6 - 22.1	19.9
12	site 1	Oct 28 1988	22.0 - 23.1	1.9
13	site 1	Oct 28 1988	20.6 - 19.7	4.6
14	site 1	Oct 28 1988	21.0 - 24.5	11.9

Note: C<sub>0</sub> represents the initial concentration of suspended sediment and @ indicates no value obtained.

#### 4. 실험 결과 및 분석

##### 4.1 농도 단면도

실험을 통해 측정된 총 14개의 농도 단면도 중 선별된 농도 단면도가 그림 4, 5, 6 에 보여준다. 각각의 그림들은 부유사 농도에 따라 변화하는 독특한 특성의 침강 영역을 명확하게 보여주고 있는데, Ross (1988) 는 이러한 각각의 영역을 저농도 ( $C < 2 \text{ g/L}$ ) 침강, 중농도 침강, 고농도 ( $C > 20 \text{ g/L}$ ) 침강 영역으로 분류한 바 있다.

그림 4는 실험 1에서 얻어진 농도 단면도를 보여준다. 이 단면도는 초기 농도가 저농도 ( $1.8 \text{ g/L}$ )인 경우인데, 저농도의 침강의 예를 잘 보여주고 있다. 부유사 농도는 바로 수주의 저면 근처를 제외하고 모든 위치에서 감소한다. 중농도 침강의 대표적인 예는 그림 5에 주어진다. 여기서의 단면도는 실험 3으로 부터 구한 농도 단면도이며 초기 농도는  $14.1 \text{ g/L}$  이었다. 이 단면도에서는 시간에 따라 수렴하는 2개의 현저한 경계면이 관측된다. 마지막으로 일반적으로 간섭침강이라고 불리는 고농도 침강의 예가 그림 6에서 잘 보여지고 있다. 이 경우에 초기 농도는  $23.7 \text{ g/L}$  이었다. 이 영역에서의 특징은 농도가 증가 할수록 부유사의 침강율은 감소한다는 것이다. 농도는 시간에 따라 Luitocline (급격한 농도 경계면) 아래의 모든 위치 (elevation)에서 증가하고 침강 현상은 전체적으로 집단적 형태에서 (in mass) 이뤄진다.

##### 4.2 침강 속도

침강실험을 통해 구한 농도 단면도들은 호수의 6개 지점에서의 퇴적물 침강 속도를 결정하기 위해 사용되었다. 침강 속도는 Ross(1988)가 개발한 수치계산 프로그램에 각각의 농도 단면도를 입력하여 계산하였다.

그림 7은 그림2의 지점 1에서 채취한 퇴적물의 침강 속도 계산 결과를 부유사 농도와 관련하여 보여준다. 그림에서 보여준 것 처럼 실험 관측 자료는 다소 분산되기는 하였지만 침강 속도가 증가하는 영역과 감소하는 영역을 명확히 보여주고 있다. 그림 7의 관측 자료는 그림 1에서 보여준 전형적인 침강 속도의 형태와 비교해 볼 때 다소 다른, 포물선형의 침강 속도를 보여주고 있다. 일반적으로 응집침강 영역에서 침강 속도는 부유사 농도와 선형 관계에 있다고 밝혀져 왔으나, 그림 7에서는 Wolanski et al. (1989)의 관측과 유사하게 간섭침강 영역에서 부터 응집침강의 영역까지 전체적으로 포물선형이 확산되는 침강 속도가 관측된다.

이러한 포물선형의 침강 속도는 다음과 같이 표기될 수 있다.

$$W_s = \frac{aC^m}{(C^2 + b^2)^m} \quad (1)$$

식 1은 Wolanski et al. (1989) 관계식의 변형식으로 응집침강과 간섭침강 영역 모두에 적용되도록 개발되었다. 침강 속도 실험 자료 결과에 최소자승적합 방법을 적용하여 4개의 미지 변수  $a, b, n$  과  $m$  은 결정될 수 있으며, 결정된 그 각각의 값들은 33.38, 4.39, 1.02 과 1.48 이다.

호수 내에서의 퇴적물 침강 속도의 공간적 변화를 검토하기 위하여, 호수 內의 6개 지점의 퇴적물에 대한 각각의 침강 속도 실험 결과가 그림 8에 통합되어 보여진다. 간섭침강 영역에서는 모든 지점에서의 퇴적물이 유사한 속도로 침강한다는 것이 관측된다. 이 현상은 이 영역에서의 침강 현상이 퇴적물의 성분에 의해 좌우되기 보다는 토사 덩어리 (aggregates)들이 형성하는 network의 영향을 지배적으로 받은 결과라고 사료된다. 그러나 퇴적물 성분의 영향은 응집침강 영역에서 명확히 나타난다. 침강 속도는 지점 1에서 가장 크며 지점 3과 6에서 가장 작다. 지점 2, 4, 와 5에서 침강 속도는 중간 값을 갖으나 자유침강 영역에 가까이 갈수록 지점 1에서의 침강 속도 값에 접근한다. 지배적으로 받은

그림 2와 관련하여 침강 속도의 공간적 변화를 살펴보면, 지점 2, 4, 5로 대표되는 다소 방대한 지역에서 침강 속도가 서로 유사하다는 것은 흥미롭다. 이것은 결과적으로 풍랑에 의한 수층의 순환과 파랑에 의해 퇴적물이 공간적으로 잘 혼합되어 있음을 의미한다. 이러한 사실을 근거로 또한 지점 1에서의 침강 속도가 다른 지점에서의 침강 속도와 다른 원인이 추정될 수 있다. 지점 1과 같이 호수의 폭이 좁은 지역에서는 바람의 영향이 적어져서 이 지역에서의 퇴적물은 다른 지역에서의 퇴적물과 충분히 혼합되지 못하였다고 사료된다. 지점 3과 6에서의 다소 작은 침강 속도에 대해서는 해수유동과 관련된 수동학적 요소들이 해저 퇴적물의 분포에 크게 영향을 미치는 주요 요인으로 작용했다고 추정된다.

## 5. 결론

본 논문에서는 미세-점착성 퇴적물로 수행한 침강실험 결과에 대하여 살펴보았다. 침강실험 결과는 응집침강 영역에서 기존의 연구 결과 (Krone, 1962; Mehta, 1988)와 다소

다른 포물선형의 침강 경향을 보였으며, Wolanski et al. (1989)의 경험식을 수정하여 침강 속도에 대한 새로운 실험식이 개발되었다. 또한 본 실험을 통해 퇴적물 침강 속도의 공간적 변화에 대해 살펴 본 결과, 퇴적물의 침강 속도는 퇴적물의 성분에 따라 변화하여 결과적으로 공간적으로 변화된다는 사실이 추정되었다. 이러한 사실들은 미세-점착성 퇴적물 이동 예측모형의 현장 적용 시, 모형에 사용되는 경험식들의 현장 혹은 실험실 실험을 통한 사전 검증 및 수정이 필수적으로 이뤄져야 한다는 것을 의미한다.

## 참 고 문 헌

- 과학기술처, 1991. 서해 연안 미세 퇴적물 이동 연구(II).
- 황 규 남, 1995. "A Model for Vertical Transport of Fine Sediment and Bed Erodibility in a Wave-Dominated Environment", 한국해양해양공학회지, Vol 7 (3), pp. 277-288.
- Hwang, K.-N., 1989. "Erodibility of Fine-Sediment in Wave-Dominated Environment", *M.S. Thesis*, University of Florida, Gainesville, Florida.
- Hwang, K.-N., and Mehta, A.J., 1989. "Fine-Sediment Erodibility in Lake Okeechobee, Florida", *UFL/COEL-89/019*, Coastal and Oceanographic Engineering Dept., University of Florida, Gainesville, Florida.
- Krone, R.B., 1962. "Flume Studies of the Transport of Sediment in Estuarial Shoaling Process," *Final Report*, Hydraulic Engineering Laboratory and Sanitary Engineering Research Laboratory, University of California, Berkeley, California.
- Kynch, G.J., 1952. "A Theory of Sedimentation," *Transactions of the Faraday Society*, Vol. 48, pp. 166-176.
- Lott, J.W., 1987. "Laboratory Study on the Behavior of Turbidity Current in a Closed-end Channel," *M. S. Thesis*, University of Florida, Gainesville, 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.
- Mehta, A.J., 1988a. "Cohesive Sediments in Estuarine Environment," *Invited Contribution to AGU Chapman Conference*, Bahia Blanca, Argentina.
- Ross, M.A., 1988. "Vertical Structure of Estuarine Fine Sediment Suspensions," *Ph.D. Dissertation*, University of Florida, Gainesville, Florida.
- Wolanski, E., Aseda, T., and Imberger, J., 1989. "Mixing Across a Lutocline," *Limnology and Oceanography*, Vol. 34, pp. 931-938.

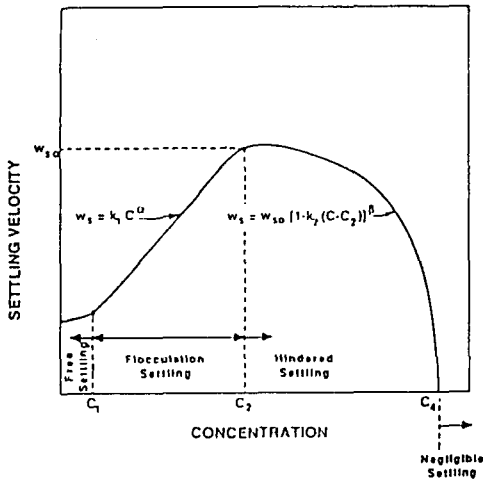


Figure 1. A Schematic Description of Settling Velocity Variation With Suspension Concentration of Fine-Grained Sediment.

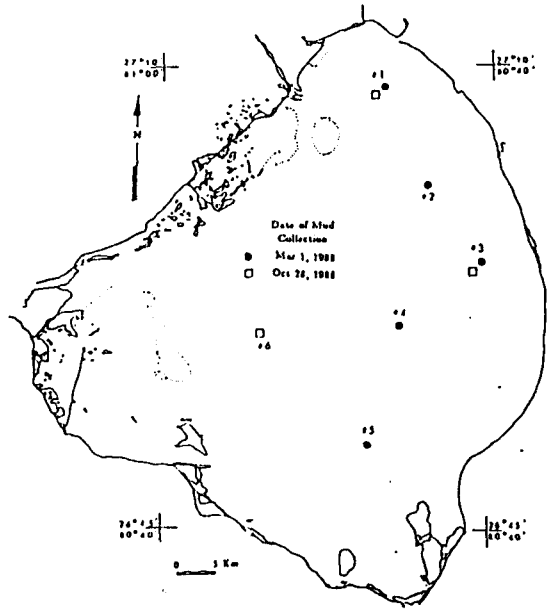


Figure 2 Sediment Sampling Sites in Lake Okeechobee.

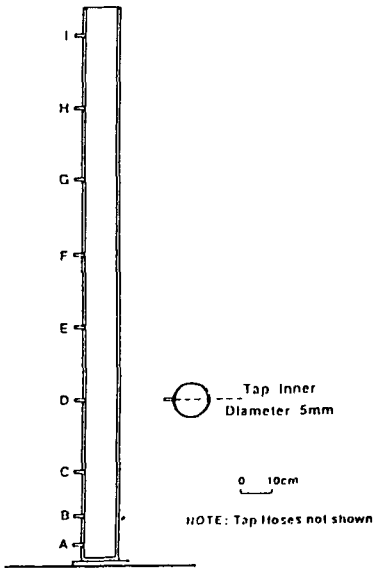


Figure 3. Scale Drawing of the Settling Column.

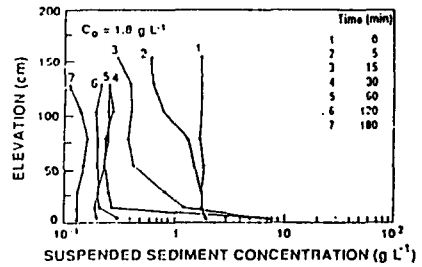


Figure 4. Concentration Profiles from Test 1; Initial Concentration of 1.8 g/L.

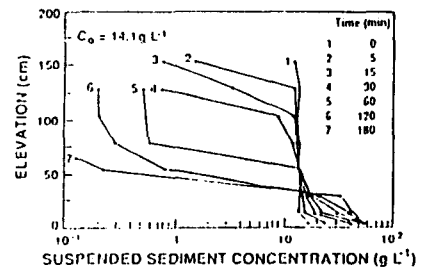


Figure 5. Concentration Profiles from Test 3; Initial Concentration of 14.1 g/L.

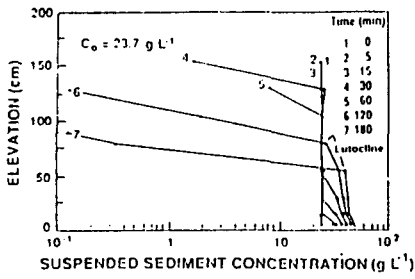


Figure 6. Concentration Profiles from Test 6; Initial Concentration of 23.7 g/L.

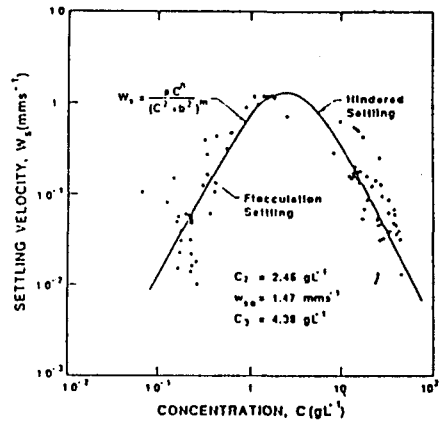


Figure 7. Settling Velocity and Settling Flux Variations with Concentration for Site 1.

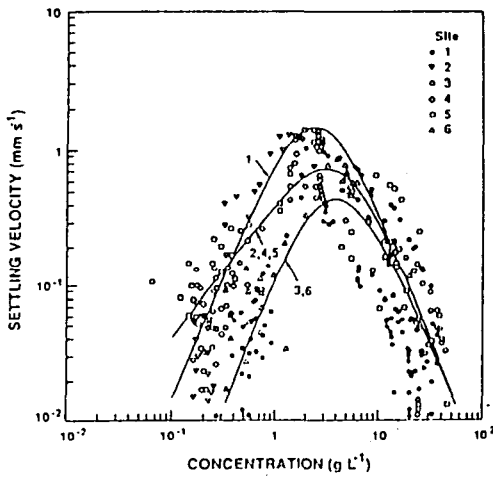


Figure 8. Spatial Comparison of Settling Velocity Variations with Concentration for Sites 1, 2, 3, 4, 5 and 6.