

금강 하구역 점착성 퇴적물에 대한 침식률 매개변수의 정량적 산정 The Quantitative Estimation of Erosion Rate Parameters for Cohesive Sediments from Keum Estuary

류홍렬* · 이현승** · 황규남***

Hong-Ryul Ryu*, Hyun-Seung Lee** and Kyu-Nam Hwang***

요 지 : 본 연구의 목적은 금강 하구역 표층에 분포하는 점착성 퇴적물의 침식특성을 정량적으로 산정하고, 그 침식특성의 계절적 변화와 타 지역 침식특성 결과와의 비교/분석을 통한 공간적 변화를 해석하는데 있다. 또한 점착성 퇴적물의 침식특성은 퇴적물 자체의 물리·화학적 기본특성에 의해 크게 영향을 받으므로, 본 연구에서는 이러한 퇴적물의 기본특성이 침식특성에 미치는 영향에 대해서도 해석하였다. 침식실험은 균일저면 조건에서 1개 지점에 대해 계절별로(가을과 겨울) 4회씩 총 8회의 실험이 환형수조를 사용하여 수행되었으며 그 결과 저면밀도 1.15~1.34 g/cm³ 범위에서 침식한계전단응력($\tau_{ce,s}$)은 0.12~0.36 N/m², 침식률 계수($\epsilon_{M,s}$)는 120.91~6.72 mg/cm²·hr 범위의 값을 갖는 것으로 확인되었으며, 산정된 침식특성 매개변수들은 다른 점착성 퇴적물(Okeechobee호, Kaolinite)과 비교해 정량적으로 상당한 차이를 보였으나 금강 하구역 내에서의 계절적 변화는 미미한 것으로 나타났다.

핵심용어 : 점착성 퇴적물, 침식특성, 물리·화학적 특성, 환형수조, 침식한계전단응력, 침식률 계수

Abstract : The purpose of this study is to quantitatively estimate the erosional properties for cohesive sediments on Keum Estuary. Then the spatial variation was evaluated, through analyzing and comparing the seasonal variation of the erosional properties in Keum Estuary with that of the erosional properties in the other sites. As erosional properties of cohesive sediments are also influenced largely by basic physico-chemical property of cohesive sediments themselves, the impact that the basic physico-chemical property has on the erosional properties is analyzed in this study. Erosional tests are performed under the condition of uniform beds. Total 8 times of tests using an annular flume are also conducted in a location, four times respectively by seasons: the fall, winter. Experimental results of erosional tests show that the critical shear stress for erosion varies in the range of 0.12~0.36 N/m² and the coefficient of erosion rate varies in the range of 120.91~6.72 mg/cm²·hr, over the corresponding bulk-density range of 1.15~1.34 g/cm³. Although the calculated parameters of erosional properties are remarkably different in quantity compared with those of other cohesive sediments(lake Okeechobee) and Kaolinite, their seasonal variabilities within Keum Estuary appear to be insignificant.

Keywords: cohesive sediments, erosional property, physico-chemical properties, annular flume, critical shear stress for erosion($\tau_{ce,s}$), coefficient of erosion rate($\epsilon_{M,s}$)

1. 서 론

연안역, 특히 하구역에서 점착성 퇴적물은 인공과 산업의 성장 및 사람의 활동량 증가에 따라 항만, 항로유지, 수질오염감시 등과 같은 적절한 항만과 하구역의 관리가 필

요하게 됨으로써 그 중요성이 인식되어 왔다. 그러나 점착성 퇴적물의 이동현상 및 상호작용들이 매우 복잡하고 그 예측이 쉽지 않아 각종 항만 및 연안개발 이용에 따른 부작용등으로 이들의 이송과 관련된 예기치 못했던 많은 피해들이 발생하고 있다. 특히 서해연안 대부분에 분포되어

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

**현대산업개발(Hyundai Development Company., Seoul 135-080, 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)

있는 점착성 퇴적물은 사질성 퇴적물과는 달리 강한 점착성을 가지고 있어 여러 가지 독성 오염물질과 쉽게 결합, 퇴적되어 해수 오염의 주된 원인이 되며, 또한 토사입자의 침강속도가 매우 작아 파랑, 조류등과 같은 해수유동에 의해 쉽게 멀리 이동할 수 있어 점착성 퇴적물의 침식/퇴적에 의한 피해 가능지역은 상당히 광범위하다고 할 수 있다(Hwang and Mehta, 1989).

하구의 점착성 퇴적물은 보통 무기성 광물(inorganic mineral), 유기물(organic material) 및 생화학물(biochemicals)의 혼합체이며, 광물 입자들은 주로 점토와 실트로 구성되어 있다. 이러한 혼합체의 퇴적 혹은 침식특성은 입자간의 응집 현상에 의해 크게 영향을 받으며, 그 응집강도는 또한 광물질 구성, 양이온 전도율, 입경분포, 유기물 함량 등으로 묘사되는 물리·화학적 기본특성에 따라 크게 변화한다(Mehta, 1986). 특히 저면 퇴적물의 침식여부는 흐름전단응력에 대한 저면퇴적물의 저항력 즉, 저면전단강도의 상대적 차에 의해 좌우되므로, 그 침식특성은 저면전단강도 혹은 저면밀도로 묘사되는 저면특성에 따라 크게 변화한다(황규남 등, 2005). 따라서 부유 입자에 부여되는 수동역학적 조건이 동일하다 하더라도, 퇴적물 자체의 특성에 따라 그 퇴적 혹은 침식특성은 달라지게 되며, 이러한 "site-specific"한 특성으로 인하여 점착성 퇴적물의 침식특성에 대한 이론적 해는 현재 없으며 현장이나 실험실 실험을 통하여 측정하는 것이 최선이다.

최근 급속도로 확대되고 있는 하구역의 인위적 개발로 인하여 항로매몰 현상이 큰 문제로 대두되고 있는 금강 하구역의 경우, 퇴적(침강)특성은 황규남·천민철(2002), 류홍렬 등(2006) 등에 의해 조사된바 있으나, 침식특성에 대한 연구는 거의 전무한 상태로, 이에 대한 구체적인 연구가 필수적으로 요구되고 있다. 따라서 본 연구에서는 금강 하구역의 점착성 퇴적물의 표본채취 및 실내실험을 통하여 금강 하구역 점착성 퇴적물의 침식특성을 정량적으로 산정하여 금강 하구역 내에서의 계절적 변화(seasonal variation) 및 타 지역 침식특성 결과와의 비교/분석을 통한 공간적(spatial) 변화를 해석하였다. 또한 실험분석을 통하여 점착성 퇴적물의 물리·화학적 특성(입경분포, 유기물 함량, 광물질 구성)을 정량적으로 조사한 후, 이러한 특성들과 침식특성간의 상관관계 및 침식특성의 정량적 변화에 미치는 영향에 대하여 해석하였다.

2. 현장 표본 채취

금강 하구역 점착성 퇴적물의 침식특성 조사를 위한 퇴적물 표본 시료는 1개 정점(지점 #1)에서 추계시(2001년 11월)와 동계시(2002년 2월)에 2회에 걸쳐 채취되었다. 앞서 언급된 바와 같이, 점착성 퇴적물의 침식특성은 퇴적물 자체의 물리·화학적 특성 및 저면 밀도로 묘사되는 저면 특성과 큰 연관성을 가지므로, 물리·화학적 및 저면 특성

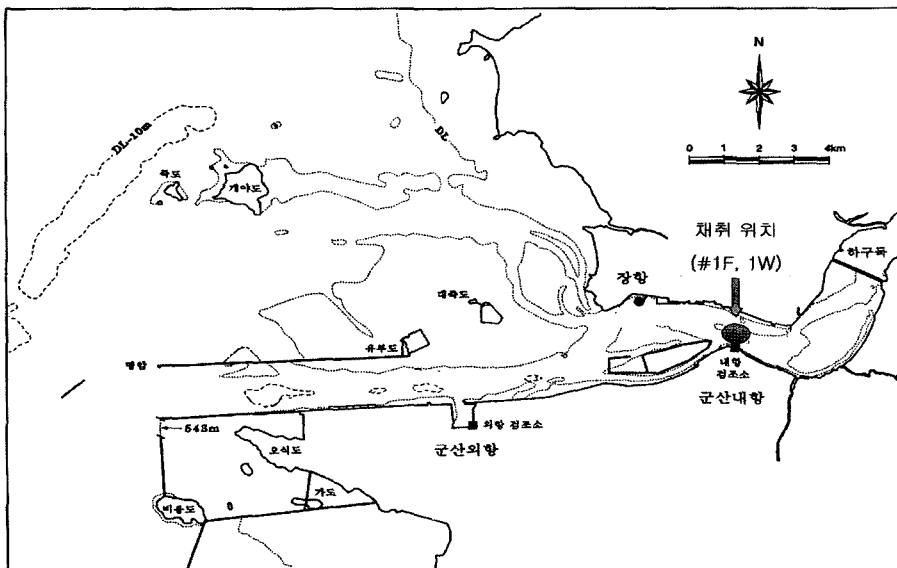


Fig. 1. Extraction location of sediment sample in Keum Estuary.

Table 1. Basic information of sampling sites(류홍렬 등, 2006)

Site No.	일 자	N	E	수온 (°C)	염도 (‰)	수심(m)	비고
1F	2001. 11. 20(Fall)	35°59'30	126°42'42	9	18.8	2.5	소조기, 간조 3시간전
1W	2002. 2. 8(Winter)			4.6	24.9	3.5	소조기, 만조 2시간전

조사를 위한 표본시료를 동일지점, 동일일자에 채취하였다.

저면특성 조사를 위한 시료들은 피스톤식 core sampler를 이용하여 채취하였으며, 침식특성 및 기본특성 조사를 위한 표본시료는 grab sampler를 이용하여 채취하였다. 또한 현장 해수의 조건을 반영하기 위하여 동일 지점에서 해수를 채취하여 침식실험의 전 과정에 사용하였다. 퇴적물 표본시료의 채취 위치는 Fig. 1에 주어지며, 채취 지점의 경위도 좌표 및 채취 당시의 수온, 염도 및 수심 관측값 또한 Table 1에 주어진다.

3. 물리·화학적 특성 실험

본 연구에서는 금강 하구역 1개 지점에서 추계시와 동계시에 채취된 2개의 표본시료에 대해 침식실험에 앞서 퇴적물 자체의 물리·화학적 특성조사를 위한 실험이 수행되었다. 수행된 실험은 입경분포, 유기물 함량, 광물질 구성에 대한 조사로 광물질 구성에 대한 분석은 정성적 분석만을 수행하였으며, 도출된 결과들은 침식특성의 계절적 변화 분석 및 과거 타 지역 연구결과와의 비교 분석시 사용된다.

3.1 입경분포

입경분포 분석은 ASTM(American Society for Testing and materials, 1987)이 제시한 방법에 따라 수행되었으며 입경분포 분석에 대한 자세한 사항은 황규남 등(2002)에 주어진다. Table 2에 보여지는 바와 같이 추계에 채취된 시료(1F)의 경우에 중앙입경과 평균입경이 각각 18.6 μm와 28.1 μm이며, 동계시료(1W)의 경우는 각각 27.4 μm와 30.7 μm로 동계시료(1W)가 추계시료(1F)보다 좀더 조립한 분포를 가지는 것으로 보이나, Fig. 2를 자세히 살펴보면 10 μm이

Table 2. Seasonal grain size characteristics of cohesive sediments in Keum Estuary

Site	입경(μm)			평균
	D ₁₆	D ₅₀	D ₈₄	
1F	7.6	18.6	58	28.1
1W	4.2	27.4	60.5	30.7

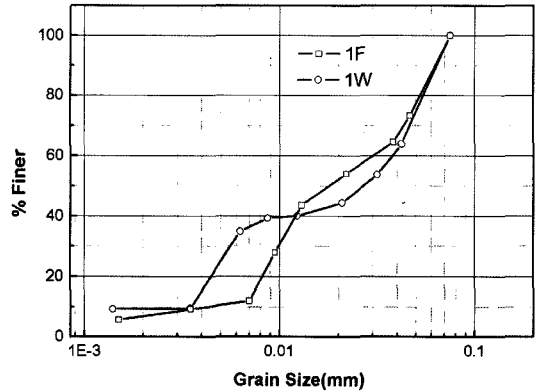


Fig. 2. Seasonal grain size distribution of Site 1 in Keum Estuary.

하의 세립자들만을 고려할 경우 시료 1W가 시료 1F에 비해 세립의 입자를 더 많이 포함하고 있음을 알 수 있다.

3.2 유기물 함량

본 연구에서 유기물 함량은 해양환경공정시험방법(국립수산진흥원, 1997)에 따른 강열감량법에 의해 수행되었으며 실험 방법 등에 대한 자세한 설명은 황규남 등(2002)에 주어진다. Table 3에서 알 수 있듯이 1F와 1W 시료에 대한 유기물 함량은 각각 2.85%와 4.12%로 큰 차이는 없으나 1W 시료가 약간 더 큰 것으로 나타났다.

3.3 광물질 구성 성분

광물질 구성 성분은 전북대학교 공동시험소가 보유하고 있는 RIGAKU사 D/MAX-A 회절분석기(x-ray diffraction)를 이용하여 정성적 분석이 수행되었다. 자원연구소 지원하에 수행된 x-ray diffractogram의 정성적 분석결과에 따르면, 1F와 1W 퇴적물 시료에 대한 광물질 구성은 계절별 변화가 거의 없이 유사한 분포양상을 보이는 것으로 나타났으

Table 3. Seasonal organism contents of Site 1 in Keum Estuary

Site	유기물 함량(%)
1F	2.85
1W	4.12

Table 4. Components of mineral matters in Keum Estuary

함량순위	금강 하구역
1	석영(Quartz)
2	미사장석(Albite)
3	Illite
4	고령토(Kaolinite), 녹니석(Chlorite)

며 분석 결과가 Table 4에 주어진다. Table 4에 보여지는 바와 같이 금강 하구역 퇴적물에 대한 광물질 구성성분은 내림차순으로 석영, 미사장석, 일나이트, 고령토, 녹니석 등이 지배적인 성분인 것으로 나타났으며, 고령토와 녹니석은 거의 비슷한 함량을 갖는 것으로 해석되었다.

4. 저면밀도와 저면전단강도 측정

저면밀도는 점착성 퇴적물의 침식률 해석 시에 가장 중요한 인자중의 하나이며 전단강도 또한 저면근처에 존재하는 액상이토층(fluid-mud layer)의 두께 해석시에 필수적인 인자이므로(Hwang and Mehta, 1989), 본 연구에서는 금강 하구역 점착성 퇴적물의 저면 특성조사를 위해 하계 및 추계 시에 채취된 2개의 표본 core 시료에 대하여 저면깊이에 따른 저면 밀도와 저면전단강도의 변화 및 두 변수간의 상관관계를 해석하였다.

현장에서 채취된 표본 core 시료들은 드라이아이스(frozen CO₂)와 변성 알코올로 우선 완전 동결시킨 후 동결된 core 시료를 약 8 cm 간격으로 절단하여 절단된 각 균일 크기의 시료에 대해 부피밀도의 측정이 이루어졌으며, core 시료의 동결과정이 부피의 팽창을 유발하므로, 부피밀도 산정 시에 이에 대한 보정이 이루어졌다. 또한 vane 전단 시험기를 이용한 저면전단강도의 측정이 이루어졌으며 1F와 1W에 대한 결과가 Fig. 3과 4에 주어진다. 비록 데이터의 분산 정도는 큰 편이나, 그림으로부터 저면밀도와 저면전단강도 모두 주로 자체 하중에 의한 압밀 효과로 인하여 일반적으로 저면깊이에 따라 증가하나, 절대 비례하지는 않는 것으로 보이며, 퇴적물의 구성성분 등에 의한 영향도 받는 것으로 추정된다. 한편, 저면 상부에는 저압밀 상태의 액상이토층이 존재하는 것이 보통이나, 그림에서 보는 바와 같이 본 측정을 통해서 이러한 층이 전혀 인식되지 않았다. Fig. 3과 4에 주어진 측정결과에 비추어, 금강 하구역 점착성 퇴적물의 저면밀도는 1.4 g/cm³와 1.9 g/cm³ 사이에서 변화하는 것으로 추정된다.

저면밀도에 대한 저면전단강도의 변화에 대한 접합곡선이 Fig. 5에 주어진다. 그림에서 보여지는 것처럼, 저면밀

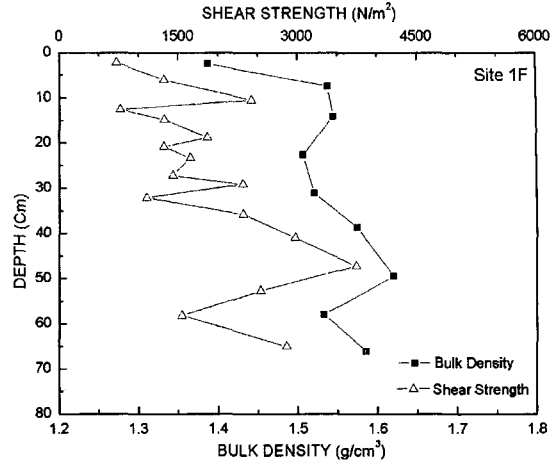


Fig. 3. Bed bulk density and bed shear strength according to bed depth(1F).

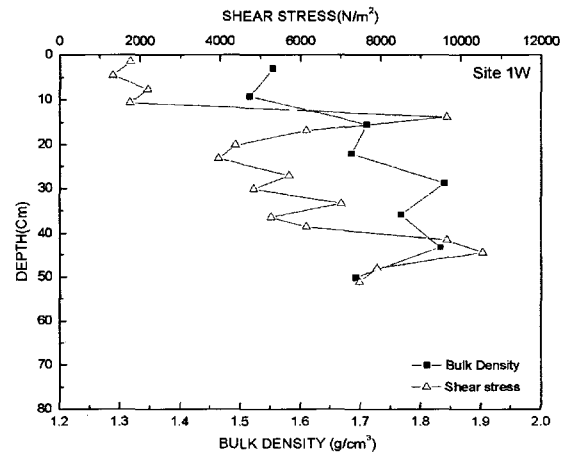


Fig. 4. Bed bulk density and bed shear strength according to bed depth(1W).

도와 저면전단강도 사이의 접합곡선을 통하여 도출된 저면 밀도 $\rho_f = 1.13 \text{ g/cm}^3$ 은 전단강도가 0이 되는 즉, 액상이토층을 의미하며 이 값은 침식한계전단응력과 침식률 계수 산정 시 필요한 필수 요소이다.

5. 침식실험

본 연구에서는 금강 하구역 점착성 퇴적물에 대한 침식 실험을 위하여 전복대 환형수조를 사용하였으며 환형수조의 제원 및 특성과 침식실험에 대한 자세한 사항은 황규남 등(2005)에 주어진다. 침식실험은 1개 지점에서 추계시와 동계시에 채취된 2개의 시료에 대해 수행되었으며 조

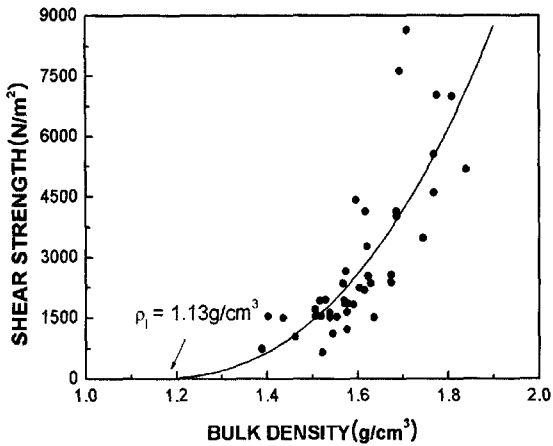


Fig. 5. Correlation between bed bulk density and bed shear strength.

성된 저면의 밀도를 변화시켜가면서 총 8회(시료별 4회)의 실험이 수행되었다. 모든 실험에서 수층의 깊이와 저면층의 두께는 각각 10 cm와 5 cm로 동일한 조건을 주었으며 동일 지점에서 채취한 해수를 실험 전과정에 사용하였다. 각 실험별로 염도와 pH는 모두 동일하였으나, 수온은 실험에 따라 약간의 차이를 보였다. 각 실험별 침식실험 조건은 Table 5에 주어진다.

초기 5 cm의 저면 두께는 실험 중 장시간 침식으로 인하여 그 두께가 변화할 수 있으며, 이에 따라 흐름에 의한 저면전단응력의 크기가 감소될 수도 있다고 여겨진다. 그러나 Maa(1993)에 의한 수치모형실험 결과에 의하면, 그 영향은 미미한 것으로 확인되었고, 또한 비록 저면이 완전하게 평탄하지 않을지라도 전체 수조에서 합리적으로 균일한 저면전단응력을 얻을 수 있는 것으로 분석된 바 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 영향은 무시되었다. 또한, 본 연구에서 침식실험을 위해 사용된 저면은 균일저면으로 밀도의 수직분포가 일정해야하며, 실험이 수행되는 동안 시

간과 깊이에 따른 밀도의 변화가 없어야 한다. 따라서 이에 대한 검토가 황규남·소상돈(2002)의 저면밀도실험과 동일한 방법을 통하여 이루어졌다. 그 결과에 따르면, 시간에 따른 밀도 변화는 저면깊이 4 cm에서 9시간 후의 경우를 제외하고 그다지 큰 변화를 보이지 않는 것으로 해석되었다. 따라서 본 연구에서 압밀에 의한 저면밀도의 증가가 저면퇴적물의 침식률에 미치는 영향은 무시될 수 있다고 하겠다.

5.1 시간에 따른 부유사 농도의 변화

침식실험은 균일하게 조성된 저면의 밀도를 변화시켜가면서 수행되었으며, 각 실험별로 시간에 따른 수조 내 부유사 농도변화 그래프가 작성되었다. Fig. 6은 저면밀도 $\rho_B = 1.34 \text{ g/cm}^3$ 일 때 시간에 따른 수조내 부유사 농도 분포 변화도로, 침식이 진행되는 동안 부유사 농도가 시간에 따라 선형적으로 증가하는 균일저면에서의 침식 현상을 잘 보여주고 있다. 또한 식 (1)을 이용하여 각 저면전단응력에 대한 침식률 산정결과가 Table 6에 주어진다.

각각의 주어진 저면전단응력에 대한 침식률은 단위 면

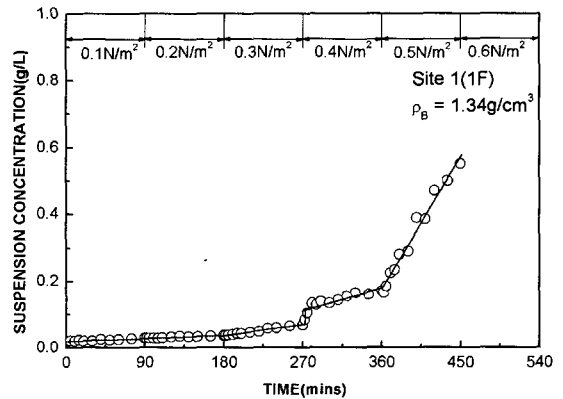


Fig. 6. Time-concentration variation(Test 1).

Table 5. Experimental conditions in erosion tests

Test No.	Site No.	ρ_B (g/cm ³)	수심 (cm)	저면 두께 (cm)	초기 전단응력 (N/m ²)	최종 전단응력 (N/m ²)	침식수의 수온 (°C)	염분농도 (%)	pH
1	1F	1.34	10	5	0.1	0.6	8-9		
2	1F	1.29	10	5	0.1	0.5	4.5-5		
3	1F	1.22	10	5	0.1	0.4	4-5		
4	1F	1.17	10	5	0.15	0.25	6-6.5		
5	1W	1.32	10	5	0.1	0.6	7.5-8	21.18	8.29
6	1W	1.25	10	5	0.1	0.4	8-9		
7	1W	1.2	10	5	0.1	0.3	7-8		
8	1W	1.15	10	5	0.05	0.25	8-9		

Table 6. Estimation of erosion rate with Fig. 6(Test 1)

단계	τ_b (N/m ²)	a	ΔC (mg/cm ³)	Δt (hour)	h (cm)	ϵ (mg/cm ² ·hr)
1	0.1	9.00×10^{-5}	0.008	1.5	10	0.054
2	0.2	9.79×10^{-5}	0.088	1.5	10	0.059
3	0.3	3.74×10^{-4}	0.034	1.5	10	0.225
4	0.4	6.01×10^{-4}	0.055	1.5	10	0.365
5	0.5	4.34×10^{-3}	0.391	1.5	10	2.604

적 당 침식된 유사입자들의 질량의 시간변화율을 전체 깊이에서의 부유사 농도의 시간변화율로 변환시킴으로써 얻을 수 있으며 다음과 같이 표현 된다.

여기서, ϵ 은 침식률, m 은 단위 저면 표면적당 침식된 유사 질량, h 는 수심을 나타낸다.

$$\epsilon = \frac{dm}{dt} = h \frac{\partial C}{\partial t} \quad (1)$$

5.2 침식한계전단응력($\tau_{ce,s}$) 및 침식률 계수($\epsilon_{M,s}$)

식 (1)과 (2) 및 Fig. 6을 이용하여 저면전단응력과 침식률간의 관계곡선이 도출되었으며, 그 결과가 Fig. 7에 주어진다. Fig. 7에서 알 수 있는 바와 같이, 주어진 저면전단응력에서의 침식률을 나타내는 데이터에 2개의 접합곡선 M_1 과 M_2 가 산정되었으며, 이로부터 그 각각의 기울기들이 계산되었다. 여기서, 접합곡선 M_1 의 기울기는 작은 전단응력 하에서의 상부의 교란된 일부 퇴적저면의 침식을 나타내고 M_2 의 기울기는 상대적으로 큰 전단응력에서의 표면 침식을 나타낸다. 상부의 일부 퇴적저면에서 침식된 유사량은 실제로 그다지 많지 않으므로, 본 연구의 목적상 여기서는 더 이상 논의되지 않는다.

균일저면에 대한 침식률은 일반적으로 식 (2)와 같이 표현된다(Arithurai and Arulanandan, 1978).

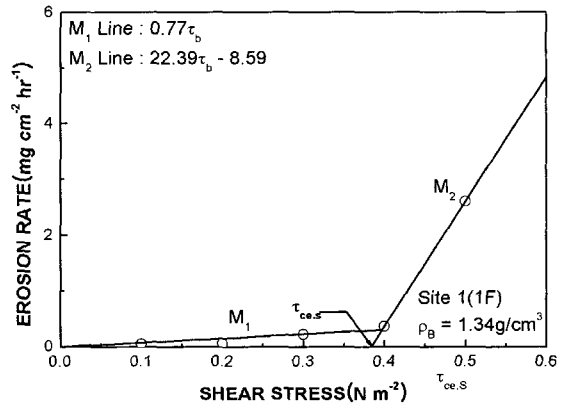


Fig. 7. Erosion rate variation with bed shear stress.

$$\epsilon = \frac{dm}{dt} = \epsilon_{M,s} \left(\frac{\tau_b}{\tau_{ce,s}} - 1 \right) \quad (2)$$

여기서, $\epsilon_{M,s}$ 는 침식률 계수, τ_b 는 바닥전단응력으로 $\tau_b = 2\tau_{ce,s}$ 일 때 침식률과 동일한 값을 갖는다.

표면침식에 대한 침식한계전단응력 $\tau_{ce,s}$ 는 접합곡선 M_2 를 횡좌표 축까지 연장시켜 구해지며, 침식률계수 $\epsilon_{M,s}$ 는 접합곡선 M_2 의 기울기와 $\tau_{ce,s}$ 를 곱하여 구해진다. 각 실험별로 산정된 $\tau_{ce,s}$ 값과 $\epsilon_{M,s}$ 값이 저면밀도 및 함수비와 함께 Table 7에 주어진다.

Table 7. Values of $\rho_B, \epsilon_{M,s}, \tau_{ce,s}$

Test No	ρ_B (g/cm ³)	함수비 (%)	$\epsilon_{M,s}$ (mg/cm ² ·hr)	$\tau_{ce,s}$ (N/m ²)
1 (1F)	1.34	146.74	8.59	0.384
2 (1F)	1.29	180.92	14.25	0.289
3 (1F)	1.22	234.04	19.86	0.194
4 (1F)	1.17	319.41	77.07	0.199
5 (1W)	1.32	157.96	4.81	0.373
6 (1W)	1.25	205.23	16.32	0.264
7 (1W)	1.20	262.37	33.95	0.196
8 (1W)	1.15	378.73	44.56	0.144

6. 침식특성 해석

6.1 저면밀도가 침식률에 미치는 영향

저면밀도(ρ_B)가 점착성 퇴적물의 침식특성을 나타내는 두 매개변수 $\tau_{ce,s}$ 와 $\epsilon_{M,s}$ 에 미치는 영향을 알아보기 위하여 각 매개변수와 ρ_B 간의 관계가 조사되었으며, 식 (3)과 (4)를 이용하여 산정된 최적접합곡선이 Fig. 8~11에 주어진다. 그림들은 두 매개변수 $\tau_{ce,s}$ 와 $\epsilon_{M,s}$ 가 저면밀도 ρ_B 와 상관성이 매우 크며, 일반적으로 ρ_B 가 증가할 때, $\tau_{ce,s}$ 는 증가하나 $\epsilon_{M,s}$ 는 감소하는 경향이 있음을 보여준다.

저면밀도 ρ_B 의 함수로 주어지는 침식한계전단응력 산정식과 침식률계수 산정식은 과거 Hwang and Mehta(1989), 황규남·소상돈(2002)에 의해 각각 식 (3)과 (4)와 같이 제시된 바 있다.

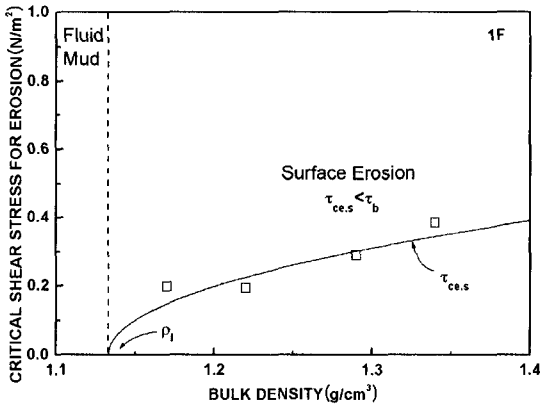


Fig. 8. Variation of critical shear stress according to bed bulk density(1F).

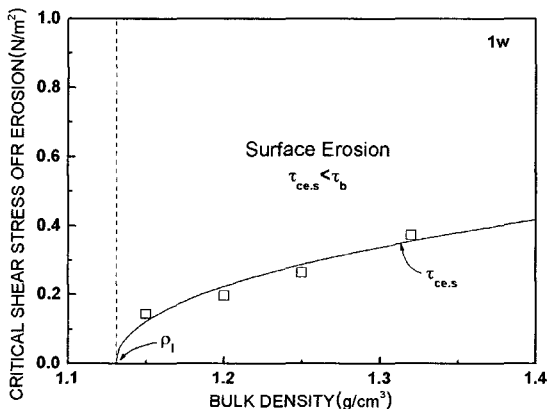


Fig. 9. Variation of critical shear stress according to bed bulk density(1W).

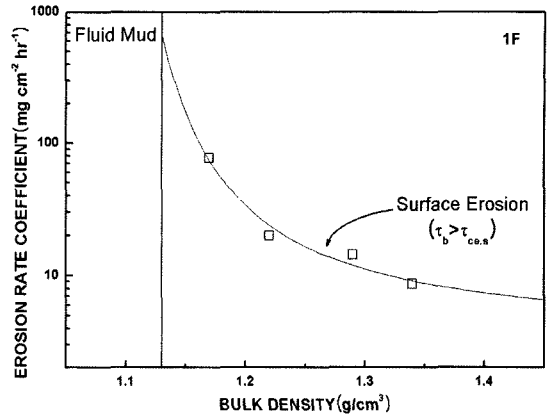


Fig. 10. Variation of erosion rate according to bed bulk density(1F).

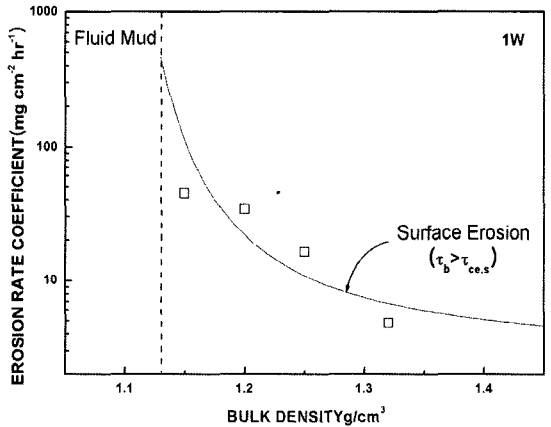


Fig. 11. Variation of erosion rate according to bed bulk density(1W).

$$\tau_{ce,s} = a_s(\rho_B - \rho_l)^{b_s} + c_s \quad (3)$$

$$\log \epsilon_{M,s} = s_1 \exp \frac{s_2}{\rho_B - \rho_3} \quad (4)$$

여기서, a_s, b_s, c_s 및 s_1, s_2 는 임의의 계수이며, ρ_l 은 저면과 액상이토층 사이에서의 경계밀도, ρ_3 는 액상이토층과 침식수 사이의 경계밀도 값을 나타낸다.

금강 하구역 점착성 퇴적물의 1W와 1F 시료에 대하여 최소자승적합법으로 구한 a_s, b_s, c_s, s_1, s_2 값은 Table 8에 주어진다. 여기서, 저면과 액상이토층(fluid mud layer) 사이의 경계밀도를 나타내는 ρ_l 은 Hwang and Mehta(1989)에 의해 산정된 바와 같이 vane전단시험을 통하여 산출되었으며, 식 (4)에서 ρ_3 의 값으로는 Hwang and Mehta(1989)

Table 8. Coefficient of Eq. (3) and Eq. (4)

Sample No	a_s	b_s	c_s	s_1	s_2	ρ_l
1F	0.746	0.481	-0.0048	1.97	-2.03	1.13
1W	0.771	0.444	-0.0130	2.09	-2.18	1.13

가 사용한 값과 동일한 1.0023 g/cm^3 를 사용하였다. Hwang and Mehta(1989)는 침강플럭스가 최대가 될 때의 부유사 농도가 ρ_s 와 일치한다고 가정하여 이 값을 사용한 바가 있다. 한편 Dyer(1995)는 침강플럭스가 최대가 될 때의 부유사 농도로 1.0065 g/cm^3 을 제시한 바가 있다.

6.2 침식특성의 계절적 변화

금강 하구역 점착성 퇴적물 침식특성의 계절적 변화를 분석하기 위해서 지점 1에서의 추계 및 동계시에 퇴적물이 채취되었으며, 비교 분석을 위한 침식특성 곡선이 Fig. 12와 13에 주어진다. 또한 정량적인 침식특성과 더불어 퇴적물 자체의 물리·화학적 특성과 연계하여 침식특성을 정성적으로 분석하기 위하여 각 퇴적물에 대한 물리·화학적 특성 실험결과도 Table 9에 주어진다.

일반적으로 평균입경이 작을수록, 유기물 함량이 많을수록 그리고 광물질 구성성분 중 고령토, 일나이트, 녹니석이 많이 포함되어 있을수록 점착력이 증가하게 되는데, 점착력이 증가하면 침식한계전단응력도 증가하게 되고, 이에

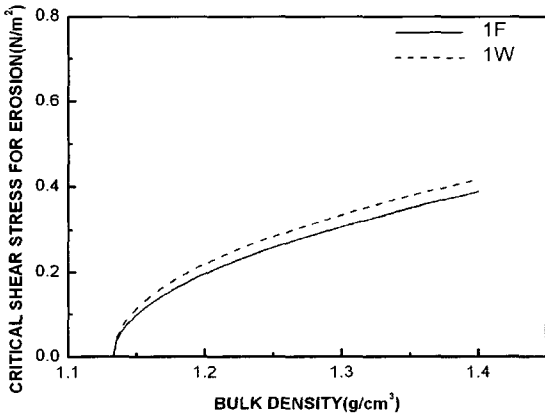


Fig. 12. Comparison of critical shear stress for erosion.

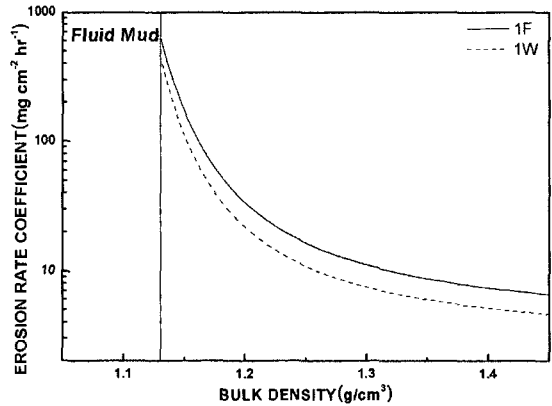


Fig. 13. Comparison of erosion rate coefficient.

반하여 침식률 계수는 작아진다. Fig. 12와 13에서 보면 알 수 있듯이 1W 시료가 1F 시료보다 침식한계전단응력이 약간 더 크고, 반면에 침식률 값은 1F 시료가 1W 시료보다 더 큰 것을 알 수 있다. 그 이유로는 비록 광물질 구성 성분은 두 시료가 동일하나, 유기물 함량이 Table 9에 주어진 것처럼 1W와 1F에 대해 각각 4.12와 2.85%로 1W지점이 약간 더 크기 때문인 것으로 추정된다. 한편, 평균 입경은 각각 30.7과 28.1 μm 로 1W지점이 약간 더 크나, Table 9에 주어진 것처럼, 10 μm 이하의 미립자량이 1W와 1F 각각 40, 30%로 1W에서 더 많다. 따라서, 유기물 함량과 미립자량의 크기에 따른 점착력의 효과 1W가 1F보다 더 크다고 할 수 있다. 이러한 해석을 바탕으로 1W가 1F보다 침식한계전단응력이 더 크고, 반면에 침식률이 더 작은 결과는 타당하다고 할 수 있다.

6.3 타 지역 퇴적물과의 침식특성 비교

본 연구를 통하여 산정된 금강 하구역 점착성 퇴적물 침식특성 ($\tau_{ce,s}$ 와 $\epsilon_{M,s}$) 측정결과의 타당성 검토를 목적으로, 본

Table 9. Physico-chemical properties of cohesive sediments in Keum Estuary

Site	평균입경 (μm)	10 μm 이하 입자의 함량(%)	유기물 함량(%)	광물질 종류
1F	28.1	30	2.85	1. 석영 2. 미사장석
1W	30.7	40	4.12	3. 일라이트 4. 고령토, 녹니석

Table 10. Experimental conditions and results in the previous studies

연구자	Test No	ρ_B (g/cm ³)	시료특성	$\epsilon_{M,s}$ (mg/cm ² ·hr)	$\tau_{ce,s}$ (N/m ²)
Hwang (1989)	1	1.12	Okeechobee호 퇴적물 유기물함량=40%	2.82	0.43
	2	1.19		2.37	0.64
	3	1.07		57.61	0.34
	4	1.09		14.61	0.55
황규남 등 (2005)	1	1.67	고령토	23.13	0.42
	2	1.56		20.34	0.41
	3	1.48		96.6	0.25
	4	1.41		75.3	0.14

연구의 결과와 과거 타 지역 점착성 퇴적물의 침식특성과 비교 검토가 이루어졌다. 균일저면과 환형수조를 사용한 침식실험 연구들 중 대표적인 예는 Hwang(1989)과 황규남 등(2005)의 연구로써, Hwang(1989)은 Okeechobee호 퇴적물에 대한 침식특성을 조사하였으며, 황규남 등(2005)은 고령토에 대한 침식특성 연구를 수행하였다. 이 두 연구들로부터 도출된 균일저면에서의 점착성 퇴적물의 $\tau_{ce,s}$ 와 $\epsilon_{M,s}$ 값들은 실험조건들과 함께 Table 10에 요약되며, 또한 이 값들은 본 연구와의 비교 검토를 목적으로 본 연구를 통하여 도출된 결과들과 함께 접합곡선식을 이용하여 Fig. 14와 15에 각각 도시하였다. 또한 본 연구의 경우, 금강 하구역 내에서의 계절적 변화가 현저하게 차이가 나지 않는 것으로 판단되므로 1F와 1W 퇴적물 시료의 결과를 통합하여 도시하였다.

Fig. 14와 15에서 알 수 있듯이 모든 퇴적물 시료에 대해 저면 밀도가 증가함에 따라 침식한계전단응력은 증가하고 침식을 계수는 감소하는 일반적인 경향을 명확히 보여준다. 한편 Hwang(1989)의 측정값들은 본 연구 결과와 큰

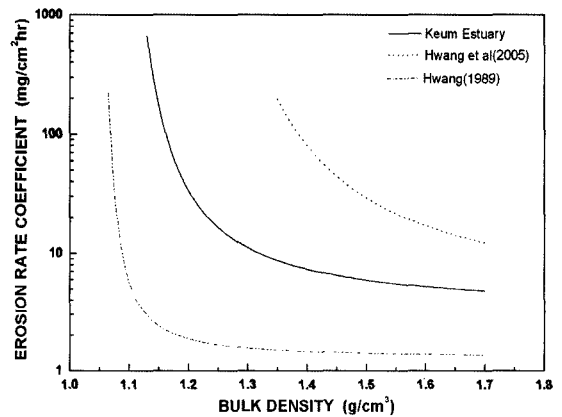


Fig. 15. Comparison of erosion rate coefficient with this study and previous studies.

Table 11. Physico-chemical properties of Keum Estuary and lake of Okeechobee

특성 항목	금강 하구역	Okeechobee호
평균입경	32 μ m	15 μ m
광물질 주성분	석영(Quartz)	고령토(Kaolinite)
유기물 함량	3%	40%

차이를 보여주는데, 그 이유는 퇴적물시료의 물리·화학적 특성에 따른 것으로 생각된다. Table 11을 보면 알 수 있듯이 금강 하구역의 유기물 함량은 약 3%이지만, Okeechobee호 퇴적물의 경우에는 40%로 금강 하구역 퇴적물에 비해 약 14배 정도 더 크다. 또한 광물질 구성성분에서 금강 하구역의 경우 주된 성분은 석영이며, Okeechobee호 퇴적물의 주된 성분은 고령토이다. 평균입경도 금강 하구역이 32 μ m이고, Okeechobee호 퇴적물은 15 μ m로 금강 하구역 퇴적물보다 1/2정도 작다.

또한 황규남 등(2005)의 연구결과와의 차이는 침식수의 특성과 실험수행시의 수온의 차이에 기인한 것으로 생각된다

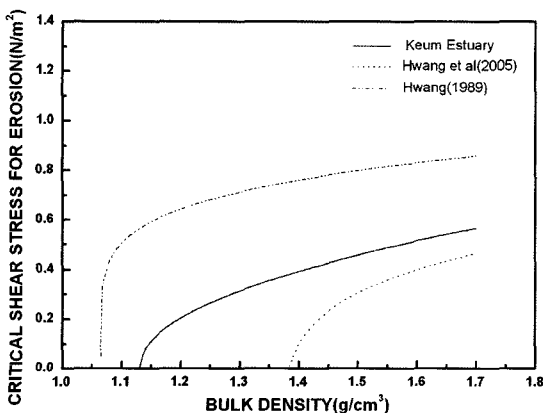


Fig. 14. Comparison of critical shear stress with this study and previous studies.

다. 금강 하구역 퇴적물의 경우 침식수로 현장에서 채수된 해수를 사용하였으며, 실험은 주로 동계시에 수행되었다. 그러나 Kaolinite의 경우는 침식수로서 수돗물이 사용되었고 실험은 주로 하계시에 수행되었다. 일반적으로 염분농도가 높을수록, 수온이 낮을수록 퇴적물의 점착력이 증가되어 침식한계전단응력은 증가하고 침식률은 감소하는 경향이 있다. 따라서 본 연구와 황규남 등(2005)의 연구결과와의 차이는 타당한 결과라 할 수 있다.

과거 타 연구와의 비교·검토 결과에 비추어, 본 연구를 통하여 산정된 금강 하구역 점착성 퇴적물의 침식특성 즉, 침식한계전단응력과 침식률 계수의 값들은 비교적 타당성 있는 값들이라 할 수 있다. 또한 타 연구결과와 비교적 큰 차이가 나는 것은 점착성 퇴적물의 침식특성이 site-specific 하기 때문이며, 어느 지역의 침식특성 계수값들은 반드시 실험을 통해서나 혹은 현장관측을 통해서만 얻을 수 있는 것을 의미한다.

8. 결 론

본 연구는 금강 하구역 점착성 퇴적물의 침식특성을 정량적으로 산정하고, 그 침식특성의 계절적 변화와 타 지역 침식특성 결과와의 비교/분석을 통한 공간적 변화를 해석을 목적으로 국내 최초로 제작된 환형수조를 이용하여 1개 지점에 대해 계절별(가을과 겨울)로 각 4회씩 총 8회의 실험이 각각 다른 밀도를 갖는 균일저면 조건하에서 수행되었다. 또한 점착성 퇴적물의 침식특성은 퇴적물 자체의 물리·화학적 기본특성에 의해 크게 영향을 받으므로, 이러한 퇴적물의 기본특성이 침식특성에 미치는 영향에 대해서도 해석하였다.

침식실험 수행 결과에 따르면 저면밀도 $1.15\sim 1.34 \text{ g/cm}^3$ 범위에서 침식한계전단응력($\tau_{ce,s}$)은 $0.12\sim 0.36 \text{ N/m}^2$ 범위까지 변화하였고, 침식률 계수($\epsilon_{M,s}$)는 밀도가 증가함에 따라 로그함수적으로 $120.91\sim 6.72 \text{ mg/cm}^2\cdot\text{hr}$ 범위에서 감소하는 경향을 보였으며, 이러한 결과는 저면밀도가 증가함에 따라 침식한계전단응력이 증가하고, 침식률 계수는 감소함을 보여주는 과거 타 연구결과와 일치하는 결과이다.

1개 지점에 대한 가을시료(1F)와 겨울시료(1W)의 침식 매개변수를 비교한 결과 그 차이가 미미하기는 하나 침식한계전단응력이 1W가 1F에 비해 더 큰 값을 가지는 반면, 침식률 계수는 1W가 더 작은 값을 가지는 것으로 나타났다. 이는 퇴적물 자체의 물리·화학적 특성과 연계하여 해석해 볼 때 1W가 1F보다 유기물 함량이 더 많고, 또한 $10 \mu\text{m}$

이하의 미세입자들의 양이 더 많아 점착력이 더 크기 때문으로 여겨진다. 또한 본 연구결과와 과거 타 연구결과와의 비교·검토를 통하여 금강 하구역 점착성 퇴적물의 침식특성 매개변수들이 다른 지역 점착성 퇴적물(Okeechobee 호, Kaolinite)과 비교해 정량적으로 상당한 차이를 나타냈으며, 이는 점착성 퇴적물의 침식특성이 site-specific 하므로 어느 대상 지역의 침식특성계수들은 반드시 실험이나 현장관측을 통해서 얻을 수 있다는 것을 의미한다.

본 연구에서 도출된 금강 하구역 점착성 퇴적물 침식특성계수의 정량적 결과는 향후에 금강 하구역에서의 해저지형변화 해석을 위한 수치모형 프로그램 사용시 요구되는 점착성 퇴적물의 침식 및 퇴적특성 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·침식특성은 현장특성(site-specific)에 현저하게 의존하는 특성을 가지므로, 황규남(2000), 황규남 등(2005) 등에 의해 강조된 바와 같이 침식특성계수의 산출을 위한 현장관측이나 실내실험이 각 조사대상 지역에서 반복적으로 수행되어야 한다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(과제번호 R05-2001-000-01343-0)지원으로 수행되었음.

참고문헌

- 류홍렬, 천민철, 황규남 (2006). 금강 하구역 미세-점착성 퇴적물의 침강특성에 관한 연구. 한국해양공학학회지, 제 18권 제3호, pp. 251-261.
- 박용철 (1997). 해양환경공정시험방법, 한국해양학회, 국립수산진흥원.
- 황규남 (2000). 새만금 갯벌퇴적물의 침강속도 산정을 위한 실험적 연구, 대한토목학회논문집 Vol.20, No. 2-B, pp. 277-286.
- 황규남, 조용식, 이태환 (2002). 새만금 미세점착성 퇴적물의 침강특성 : 퇴적물의 물리·화학적 특성의 영향, 한국수자원학회논문집 제35권 제 5호 pp. 475-484.
- 황규남, 소상돈 (2002). 환형수조를 이용한 미세-점착성 퇴적물의 침식특성 조사. 한국수자원학회 학술발표회논문집(II), pp. 1075-1080.
- 황규남, 소상돈, 김태민 (2005). 미세-점착성 퇴적물의 침식률

- 산정을 위한 실험적 연구, 한국해양·해양공학회논문집 제17권 제2호 pp. 119-128.
- American Society for Testing and Materials, (1987). Annual Book of A,S,T,M. Standards, Vol. 04.08, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, U,S,A.
- Ariathurai, R. and Arulanandan, K. (1978). Erosion rates of cohesive soils, J. Hyd. Div., Asce. 104, HY2, 279-283.
- Hwang, K.-N., (1989). Erodibility of fine sediment in wave-dominant environments., Master's Thesis, University of 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.
- Maa, J.P.Y. (1993). VIMS Sea Carousel: its hydrodynamic characteristics. In: Nearshore and Estuarine Cohesive Sediment Transport, A.J. Mehta (ed.), American Geophysical Union, Washington, pp. 265-280.
- 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, pp. 290-325.

Received June 23, 2006

Accepted November 17, 2006