

목포해역 점착성 퇴적물의 침식특성에 대한 실험적 연구

김만곤* · 양수현* · 태동현* · 황규남*

*전북대학교 토목공학과

A Laboratory Study for Erosional Properties of Cohesive Sediments from Mokpo Coast

Man Kon Kim*, Su-Hyun Yang*, Dong Hyeon Tae* and Kyu-Nam Hwang*

*Civil Engineering, Chonbuk National University, Jeonju, Korea

KEY WORDS: Mokpo coast 목포해역, Cohesive sediments 점착성 퇴적물, Critical shear stress for erosion 침식한계전단응력, Erosion rate coefficient 침식률계수

ABSTRACT: The purpose of this study is to quantify the erosional parameters, such as the critical shear stress for erosion and the erosion rate coefficient for cohesive sediments from the Mokpo coast. Using Chonbuk annular flume, five erosion tests were conducted under the uniform bed condition but a different bed density respectively. Erosion test results for Mokpo sediments have shown increases in the range of 0.16~0.43 N/m² but decreases exponentially in the range of 272~4.64 mg/cm² · hr for the given bed shear stress of 1.14~1.34 g/cm³. The erosional parameters of Mokpo sediments are found to vary remarkably in quantity compared with those for cohesive sediments from other sites. On the whole, the value of Mokpo coast sediments appears to be similar to Kunsan sediments but smaller than Saemankeum and Okeechobee sediments. On the other hand, Mokpo sediments have been shown to be larger than Saemankeum and Okeechobee sediments but smaller than Kunsan sediments.

1. 서 론

연안역에서의 대규모 인위적 개발은 준평형 상태로 유지되어 온 해역의 물리·생태학적 역학관계를 변화시켜 경제적, 환경적 및 안정성 측면에서 많은 문제를 발생시킬 수 있다는 것은 이미 잘 알려진 사실이다(황규남과 김태인, 2000; 양수현과 황규남, 2008). 일반적으로 해안공학적 측면에서 연안역의 인위적 개발로 인하여 야기될 수 있는 문제점들은 크게 두 가지로 구분될 수 있다. 그 첫째는 해수유동 체계와 직접적으로 관련된 동수역학적 문제들로, 조석 확폭현상에 의한 해수범람 및 조석유동체계의 변화로 인한 창조 혹은 낙조우세 심화 등이 그 대표적인 예라 할 수 있다. 두 번째로는 해수유동 체계의 변화로 인하여 2차적으로 초래되는 제반 퇴적환경의 변화들이다. 예를 들어, 창조우세가 심화되면, 수로에서의 Flushing 효과가 저하되어 국부적으로 급격한 항로매몰 현상이 발생될 수 있으며, 반대로 낙조우세가 심화되면, Flushing 효과의 강화로 인하여 수로제방 및 해안 침식이 초래될 수 있다.

지난 20년간, 목포 해역에서는 해수유동 체계에 영향을 줄 수 있는 대규모 인위적 개발이 지속적으로 추진되어 왔다. 구체적으로, 영산강 종합개발 계획에 따라 1~2단계 사업으로써 영산

강 상류에 4개의 댐(담양, 장성, 나주, 광주댐)과 영산강 하구언이 축조되었고, 또한 3단계 사업으로 영암 및 금호 방조제의 건설이 완료되었으며, 그 후에도 4단계 사업으로 간척사업이 지속적으로 추진되어 왔다. 또한, 최근 서남권 개발 계획이 발표됨에 따라 동북아 물류 거점으로서의 역할을 수행하기 위한 고하도 신외항의 개발이 이미 진행되고 있으며, 그 밖에도 목포대교 건설 및 고하도 개발 등의 다양한 개발공사가 수행 중에 있다.

한편, 목포 해역에서의 이러한 대규모 개발로 인한 해수유동 체계의 변화 및 이로 인한 문제점들에 대한 조사와 연구는 최근 여러 연구자들에 의해 여러 차례 체계적으로 수행되었다(강주환 등, 2004; 2005; 문승록 등, 2006). 한 예로, 문승록 등(2006)에 의하면, 영산강 하구언 및 영암, 금호 방조제 건설 이후 조석 확폭현상의 발생으로 인하여 해안 저지대의 침수발생이 심화되고 있는 것으로 조사되었으며, 또한 대규모 개발이 진행됨에 따라 조류속이 크게 변화하고 낙조우세가 매우 강화된 것으로 밝혀졌다(강주환 등, 2004).

해수유동 체계에 대한 이러한 연구 결과들에 비추어, 목포 해역에서의 해수유동 체계의 변화는 명백한 사실인 것으로 추정된다. 한편, 해수유동 체계의 변화는 퇴적물 이송체계의 변화와 직결된다는 점을 고려할 때에, 해수유동체계의 변화와 더불어 2

차적으로 목포 해역에서의 제반 퇴적환경이 변화될 가능성은 매우 높아 보이며, 또한 최종적으로는 항로 매몰 혹은 수로제방의 침식 등의 문제점들이 초래될 가능성이 배제될 수 없다. 그러나, 본 해역에서의 제반 퇴적환경 변화에 대한 연구는 거의 수행된 바가 없는 상태로, 이에 대한 체계적인 연구와 조사는 필수적이면서도 매우 시급한 사항이라 할 수 있다.

한편, 목포 북항 인근 해역에는 미세 점착성 퇴적물이 널리 분포되어 있는데, 이러한 퇴적물의 이송특성은 입자간의 응집현상에 의해 크게 영향을 받으며, 그 응집강도는 또한 광물질 구성, 양이온 전도율, 입경분포, 유기물 함량 등으로 묘사되는 물리·화학적 기본특성에 따라 크게 변화한다(Mehta, 1986). 한 예로, 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.

본 연구에서는 목포해역에서의 제반 퇴적환경 변화 해석 및 평가를 위한 기초연구 단계로써, 퇴적물의 침식, 퇴적, 연행부상 등의 여러 기본 이송 특성 중에 우선적으로 침식특성 파악을 목적으로 목포해역 점착성 퇴적물에 대한 침식실험이 수행되었다. 침식실험은 국내 최초로 제작되고 타당성이 검증된 전북대 환형수조를 이용하여 수행되었으며, 이를 통하여 침식한계전단응력 및 침식률계수로 대표되는 목포해역 점착성 퇴적물의 침식매개변수들이 정량적으로 산정되었다. 또한 본 연구에서는 목포해역 점착성 퇴적물의 물리·화학적 특성이 정량적으로 분석되었는데, 이러한 특성들과 침식매개변수들간의 정성적 상관관계 해석을 통하여, 목포해역 점착성 퇴적물의 침식특성 산정결과의 타당성이 간접적으로 검토되었다. 본 연구를 통하여 도출된 목포해역 점착성 퇴적물의 침식특성에 대한 정량적 결과들은 향후 목포해역에서의 퇴적물 이송에 따른 침/퇴적 변화 예측/평가를 위한 수치모형 실험 시 기초자료로 활용될 수 있을 뿐만 아니라, 부유사 확산 및 수질오염에 대한 대책방안 수립 등 다양한 목적으로 크게 활용될 수 있을 것이다.

2. 현장 퇴적물 표본시료 채취

목포해역 점착성 퇴적물의 물리·화학적 기본특성 및 침식특성 분석을 위한 퇴적물 표본시료는 2009년 4월 30일에 1개 지점에서 채니기(Grab sampler)로 채취되었다. 또한 현장 해수의 조건을 반영시키기 위하여 동일 정점에서 해수가 채취되었으며, 채취된 해수는 침식실험의 전 과정에서 사용되었다. 목포해역 퇴적물 표본시료의 채취 위치도는 Fig. 1에 주어지며, 퇴적물 표본시료 채취당시의 수온, 염도, 수심 및 pH는 Table 1에 주어진다.

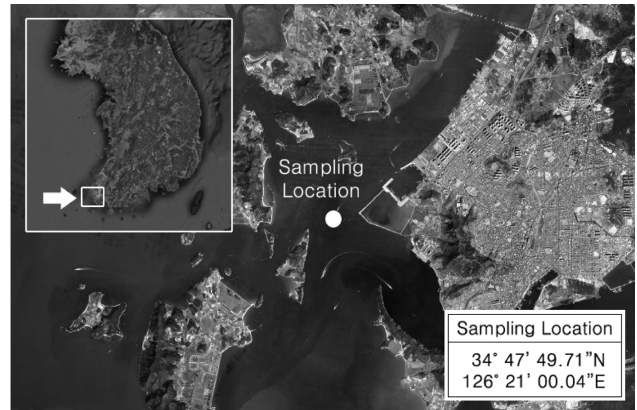


Fig. 1 Locations of sediment sampling in Mokpo

Table 1 Properties of sea water used as an eroding fluid

Sampling date	Water temperature (°C)	Salinity (%)	Depth (m)	pH
2009. 04. 30.	9.5	33.4	14.5	8.1

3. 점착성 퇴적물의 물리·화학적 특성

점착성 퇴적물의 침식특성은 입자간의 응집현상에 의해 크게 영향을 받는다. 한편, 입자간의 응집은 개개의 입자가 갖는 고유 크기의 점착력에 따라 달라지고, 또한 이러한 점착력은 퇴적물 자체의 기본적 특성 즉, 퇴적물의 입경분포, 유기물 함량, 광물질 구성 성분, CEC(Cation exchange capacity) 등으로 표현되는 퇴적물의 물리·화학적 기본특성에 따라 크게 변화하므로 (Mehta, 1986), 이러한 항목들에 대한 조사 및 분석은 필수적 기본 사항이다. 본 연구에서는 목포해역에서 채취된 퇴적물 표본시료에 대한 침식실험에 앞서 퇴적물 자체의 물리·화학적 특성조사를 위한 실험이 수행되었다. 조사 항목은 입경분포, 유기물 함량, 광물질 구성이며, 도출된 결과들은 침식매개변수 산정결과의 타당성 분석시 사용되었다.

3.1 입경분포

본 연구에서 입경분포는 체분석과 비중계법을 병행하여 분석되었다. 우선, 현장 채취된 퇴적물 표본시료는 No.200번 체($\phi=75\mu\text{m}$)를 기준으로 Wet-sieving 방법으로 분리되었으며, No.200번 체를 통과한 시료에 대해서는 비중계 실험이 수행되고 체에 남은 시료에 대해서는 체 분석이 수행되었다. 한편, 비중계 실험은 ASTM(1987)이 제시한 방법에 따라 수행되었으며, 입경분포 실험은 시료 전처리 과정을 통하여 순수 토사만으로 구성된 시료에 대해 수행되었다. 본 연구에서 도출된 입경분포 측정 결과는 군산해역(임상호 등, 2008), 새만금해역(황규남 등, 2008) 및 Okeechobee호(Hwang and Mehta, 1989) 퇴적물의 입경분포 결과와 함께 Fig. 2 및 Table 2에 주어진다.

Fig. 2에 제시된 바와 같이, 목포해역 퇴적물의 입경분포는 군산해역의 퇴적물과 대체적으로 유사한 입경분포를 가지며, Okeechobee호 퇴적물보다 조립의 분포를 갖고 새만금 퇴적물

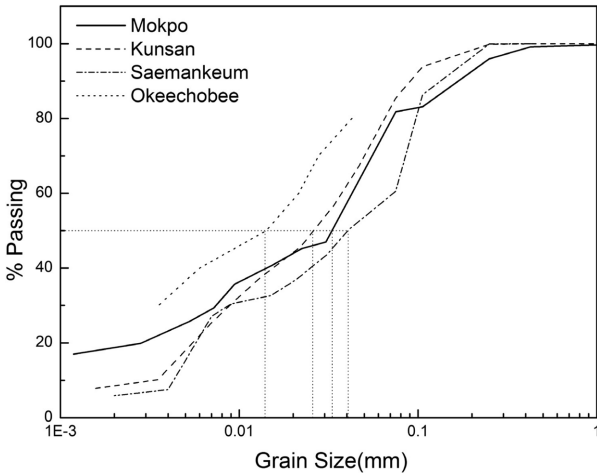


Fig. 2 Comparison of grain size distribution for cohesive sediments

Table 2 Comparison of grain size content for cohesive sediments

Site	Sand (%) (d > 62.5)	Silt (%) (62.5 < d < 4)	Clay (%) (d < 4)
Mokpo	23	52	25
Kunsan	22	65	13
Saemankeum	61	28	11
Okeechobee	-	68	32

보다는 비교적 세립한 분포를 갖는 것으로 나타났다. 또한, Table 2로부터 알 수 있는 바와 같이, 목포해역 퇴적물의 점토 함량은 25%로서, 군산 및 새만금에 비해 점토의 함량이 약 2배 정도 많은 것으로 나타났다.

3.2 유기물 함량

본 연구에서 목포해역 퇴적물의 유기물 함량은 해양환경공정 시험방법(국립수산진흥원, 1997)에 따라 강열감량법으로 분석되었다. 목포해역 퇴적물에 대해 산정된 유기물 함량은 타 지역 퇴적물의 유기물 함량과 함께 Table 3에 주어진다. 표에 주어진 결과에 따르면, 목포해역 퇴적물의 유기물 함량은 10% 이하로 군산 및 새만금 퇴적물의 유기물 함량과 비슷한 수준인 것으로 나타났으며, 유기물 함량이 40%인 Okeechobee호와는 매우 큰 차이가 있음을 알 수 있다.

Table 3 Comparison of organic contents for cohesive sediments

Site	Organic contents (%)
Mokpo	6
Kunsan	3
Saemankeum	3
Okeechobee	40

3.3 광물질 구성성분

목포해역 표본시료의 광물질 구성성분은 한국지질자원연구원의 회절분석기(X'pert MPD)를 이용하여 정량적으로 수행되었으며 분석결과는 타 지역의 결과들과 함께 Table 4에 주어진다. 표로부터 알 수 있는 바와 같이, 목포해역 퇴적물은 군산 및 새만금 퇴적물의 분석결과와 비교적 비슷한 구성을 갖는 것으로 나타났으며, Okeechobee호 퇴적물의 광물질 구성성분은 목포해역과 달리 고령토가 지배적 구성성분임을 알 수 있다.

4. 현장 퇴적물 표본시료 채취

4.1 실험 방법 및 조건

목포해역 점착성 퇴적물에 대한 침식실험은 전북대 환형수조를 이용하여 수행되었다. 본 수조는 점착성 퇴적물의 침식률 산정을 목적으로 국내 최초로 제작된 국내 유일의 환형수조로, 황규남 등(2005)과 류홍렬 등(2006)에 의해 수조의 성능, 침식실험 방법 및 실험결과 등에 대한 타당성 검증이 수행된 바 있다. 전북대 환형수조의 제원 및 특성에 대한 자세한 사항은 황규남 등(2005)에 주어진다.

본 연구에서 침식실험은 목포해역에서 채취된 시료를 이용하여 조성된 균일저면의 밀도를 변화시켜가면서 총 5회 수행되었으며, 모든 실험에서 수층의 깊이와 저면층의 두께는 각각 10cm와 5cm로 동일하게 적용되었다. 또한, 퇴적물이 채취된 정점과 동일 정점에서 채취된 해수가 실험 전체 과정에서 침식수(Eroding fluid)로 사용되었다.

각 실험별 침식실험 조건은 Table 5에 주어진다. 표에 주어진 바와 같이, 침식 실험에서 흐름에 의한 바닥전단응력 조건은 초기 값으로 0.1N/m²이 적용되었으며, 단계별로 0.1N/m²씩 2~6 단계에 걸쳐 증가되었다. 또한, 각 단계별로 바닥전단응력은 90분씩 가해졌으며, 전단응력이 가해지고 있는 90분 동안 수조 내 수층의 탁수가 각각 0, 2, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 60, 75, 90분

Table 4 Comparison of mineralogical composition

Rank	Mokpo	Rank	Kunsan	Rank	Saemankeum	Rank	Okeechobee
1	Quartz (41.3%)	1	Quartz	1	Quartz	1	Kaolinite
2	Albite (19.3%)	2	Albite	2	Feldspal, Albite	etc.	Montmorillonite
3	Sericite (14.8%)	3	Illite	3	Illite		Sepiolite
4	Illite (8.4%)	4	Kaolinite	4	Kaolinite		Quartz
5	Orthoclase (6.9%)		Chlorite		Chlorite		
6	Kaolinite (4.7%) Chlorite (4.6%)						

Table 5 Experimental conditions in erosion tests

Test No.	ρ_B (g/cm ³)	Initial shear stress (N/m ²)	Final shear stress (N/m ²)	Eroding fluid temperature (°C)
1	1.34	0.1	0.6	9.5
2	1.29	0.1	0.4	9.2
3	1.25	0.1	0.3	9.6
4	1.19	0.1	0.3	10.2
5	1.14	0.1	0.2	9.4

에 채취되었다. 전체 수층에서의 평균 부유사 농도를 측정하기 위하여 수층의 각기 다른 2개의 높이에서 탁수가 동시 채취되었으며, 그 평균값이 실험결과 해석시에 사용되었다. 침식실험 방법에 대한 자세한 사항은 황규남 등(2005)에 주어진다.

4.2 침식실험 결과

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

$$\epsilon = \epsilon_M \left(\frac{\tau_b}{\tau_{ce}} - 1 \right) \tag{1}$$

여기서 ϵ_M 은 침식률 계수이고, τ_b 는 흐름에 의한 바닥전단응력이며, τ_{ce} 는 침식한계전단응력 또는 저면전단강도이다. 한편, 본 침식실험에서 각각의 주어진 바닥전단응력에 대한 침식률은 단위 면적당 침식된 유사질량의 시간변화율을 전체 깊이(수심)에서의 부유사 농도(C)의 시간(t)에 따른 변화율로 변환시킴으로써 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\epsilon = \frac{\partial m}{\partial t} = h \frac{\partial C}{\partial t} \tag{2}$$

여기서 m 은 단위 저면 표면적당 침식된 유사량, h 는 수심을 나타낸다.

본 연구에서 침식실험은 각기 다른 밀도의 균일저면 조건 하에서 각각 수행되었는데, 우선적으로 수조 내 부유사 농도의 시간적 변화가 각 저면밀도별로 각각 작성되었다. 한 예로 Test #4의 경우에 작성된 부유사 농도의 시간변화도가 Fig. 3에 주어진다. Test #4는 저면밀도 ρ_B 가 1.19g/cm³인 경우인데, Fig. 3은 침식이 진행되는 동안 부유사 농도가 시간에 따라 선형적으로 증가하는 현상을 잘 보여주고 있다.

식 (1)과 (2) 및 Fig. 3의 결과로부터 주어진 τ_b 에 대한 ϵ 이 각각 산정되었으며 또한 이로부터 두 개의 접합곡선 M_1 과 M_2 가 산정되었는데, 그 결과는 Fig. 4에 주어진다. 그림에서 접합곡선 M_1 은 작은 바닥전단응력에서 상부의 교란된 일부 퇴적저면(Fluff)의 침식을 나타내고, M_2 는 상대적으로 큰 바닥전단응력에서의 표면침식을 나타낸다. 한편, 본 연구의 목적은 표면침식 특성에 관한 연구이므로 Fluff 침식에 대한 구체적인 설명은 생략된다. 또한 본 연구에서 침식한계전단응력 τ_{ce} 는 Shields(1936)가 제시한 방법에 따라 접합곡선 M_2 를 황좌표 축까지 외삽시켜 산정되었으며, 침식률계수 ϵ_M 은 접합곡선 M_2 의 기울기와 τ_{ce} 를 곱하여 도출되었다. Fig. 4에 주어진 목포해역 점착성 퇴적물에

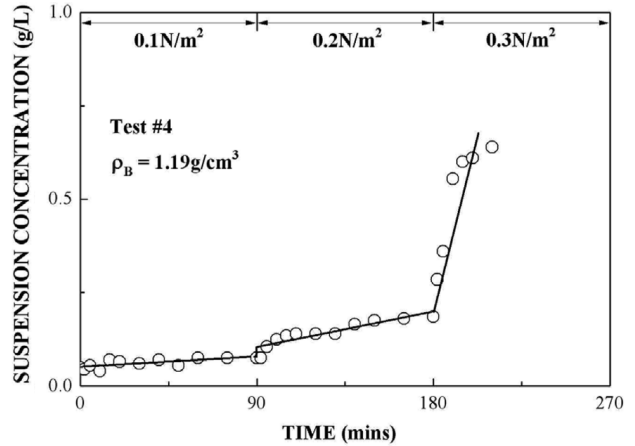


Fig. 3 Time-concentration variation (Test #4)

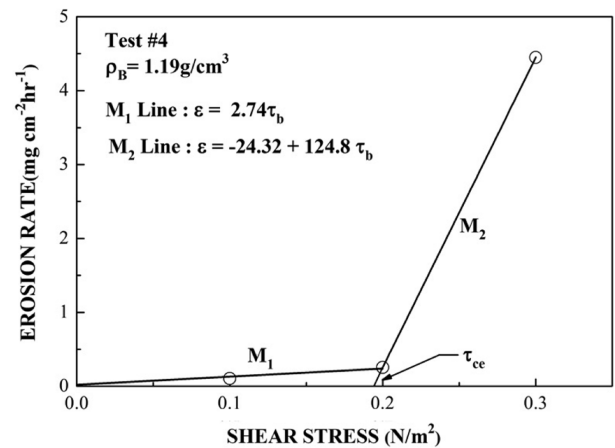


Fig. 4 Erosion rate variation with τ_b for Test #4

Table 6 Value of ρ_B , ϵ_M and τ_{ce} for each test

Test No.	ρ_B (g/cm ³)	τ_{ce} (N/m ²)	ϵ_M (mg/cm ² /hr)
1	1.34	0.43	4.52
2	1.29	0.30	8.39
3	1.25	0.28	12.07
4	1.19	0.19	24.32
5	1.14	0.18	106.46

대한 침식실험 결과는 저면밀도(ρ_B)가 1.19g/cm³일 때에, 침식한계전단응력(τ_{ce})이 0.19N/m²이고 침식률계수(ϵ_M)는 24.32mg/cm²·hr임을 보여준다. 각 실험별로 산정된 τ_{ce} 및 ϵ_M 값은 저면밀도 값과 함께 Table 6에 주어진다.

5. 침식특성 해석

5.1 저면밀도의 영향

저면밀도(ρ_B)가 점착성 퇴적물의 침식특성을 나타내는 두 매개변수 τ_{ce} 와 ϵ_M 에 미치는 영향을 알아보기 위하여 각 매개변수와 저면밀도간의 관계가 조사되었으며, 그 결과는 Fig. 5 및 Fig.

6에 주어진다. 그림들로부터 두 매개변수 τ_{ce} 와 ϵ_M 이 모두 각각 저면밀도 ρ_B 와 상관성이 매우 크며, 일반적으로 저면밀도 ρ_B 가 증가함에 따라 침식한계전단응력 τ_{ce} 은 로그함수적으로 증가하고, 침식률계수 ϵ_M 는 지수함수적으로 감소하는 경향이 있음을 알 수 있다. 특히, 저면밀도 값이 비교적 작은 구간에서는 침식한계전단응력 및 침식률계수 값 모두가 급격히 변화하다가, 저면밀도 값이 커질수록 그 변화율은 모두 완만해지는 비선형적인 경향이 있음을 명확히 알 수 있다. 일반적으로, 저면밀도가 증가하게 되면 입자간의 응집력이 향상되어 저면이 지니는 전단강도가 증가하게 되는 동시에 주어진 바닥전단응력, 즉 흐름력에 대한 저면의 저항력이 향상되어 침식한계전단응력은 증가되는 반면에 침식률계수는 감소하게 된다. 따라서, 이러한 점을 고려할 때에, Fig. 5 및 Fig. 6에 주어지는 목포해역 점착성 퇴적물에 대한 본 침식실험 결과는 매우 타당한 결과라 하겠다.

본 연구에서는, 저면밀도 ρ_B 의 함수로 주어지는 침식한계전단응력 산정식과 침식률계수 산정식을 도출하기 위하여, 과거 Hwang and Mehta(1989)와 황규남 등(2005)에 의해 사용된 다음의 식 (3)과 (4)를 적용하였다.

$$\tau_{ce} = a(\rho_B - \rho)^b + c \tag{3}$$

$$\log \epsilon_M = s_1 \exp \frac{s_2}{\rho_B - \rho_3} \tag{4}$$

여기서 a, b, c 및 s_1, s_2 는 실험을 통하여 결정되는 퇴적물의 기본특성과 관련된 계수들이며, ρ 와 ρ_3 는 각각 저면과 액상이토층(Fluid mud layer)의 경계에서의 퇴적물의 밀도 및 액상이토층과 수층 경계에서 부유사의 밀도 값을 나타낸다.

한편, Hwang and Mehta(1989)는 ρ_3 가 침강플럭스가 최대가 될 때의 부유사 농도와 일치한다고 가정하고, ρ_3 값으로 1.0023g/cm^3 을 사용하였는데, 본 연구에서도 이들과 동일한 ρ_3 값이 적용되었다. 또한, ρ 값과 관련하여, Hwang and Mehta(1989)는 ρ 이 Vane 전단강도가 영(Zero)이 될 때의 저면밀도와 동일하다고

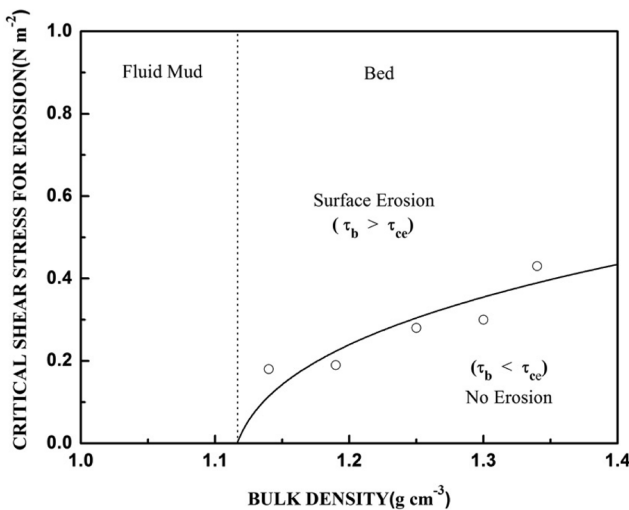


Fig. 5 Variation of critical shear stress for erosion, τ_{ce} with bed bulk density

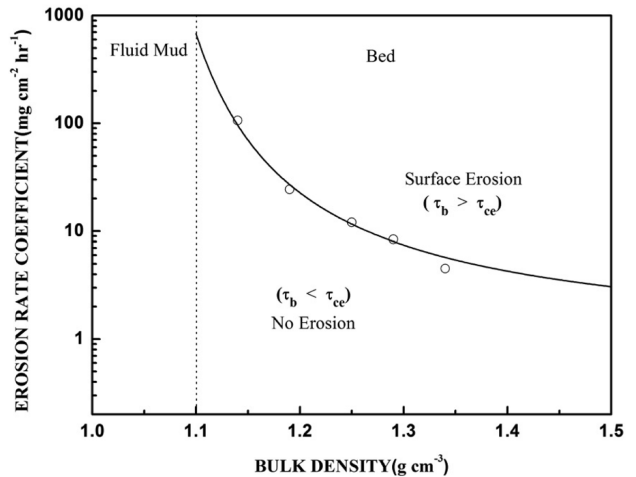


Fig. 6 Variation of erosion rate coefficient, ϵ_M with bed bulk density

가정하였으며, 이러한 가정에 근거하여 류홍렬 등(2006) 또한 군산해역 퇴적물에 대해 저면밀도 및 Vane 전단강도를 측정하고 두 변수간의 상관관계 해석을 통하여 ρ 값으로 1.13g/cm^3 을 산정하고 적용한 바 있으나, 본 연구에서는 접합곡선 산정시 최적값인 1.12g/cm^3 이 적용되었다.

식 (3) 및 (4)를 적용하여 최소자승접합법으로 구한 침식한계전단응력 및 침식률계수에 대한 산정식들은 Fig. 5 및 Fig. 6에서 각각의 접합곡선으로 주어진다. 퇴적물의 기본특성과 관련된 계수들 a, b, c 및 s_1, s_2 값은 각각 0.843, 0.332, -0.171, 0.061, 1.156으로 산정되었다.

5.2 타 지역 점착성 퇴적물의 연구결과와의 비교

목포해역 점착성 퇴적물의 침식특성을 나타내는 두 매개변수 τ_{ce} 와 ϵ_M 에 대한 본 연구의 실험결과와 과거 타 지역 점착성 퇴적물들에 대한 실험결과와의 비교·검토를 통하여 점착성 퇴적물의 침식특성의 지역적 변화에 대한 정성적 분석이 수행되었다. 본 연구를 통하여 도출된 목포해역 점착성 퇴적물에 대한 침식특성 산정결과는 군산(임상호 등, 2008), 새만금(황규남 등,

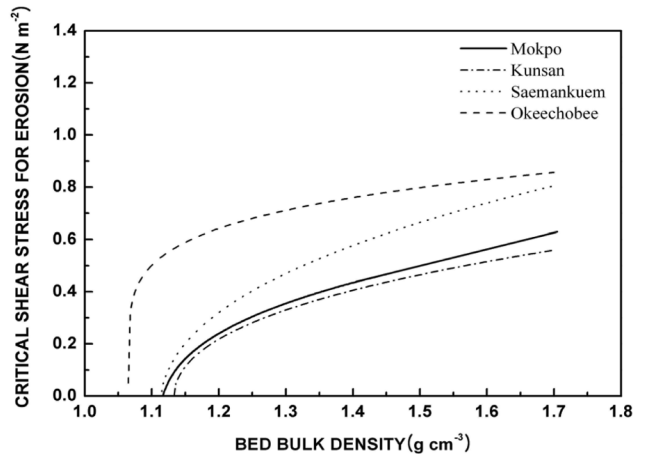


Fig. 7 Comparison of τ_{ce} for Mokpo sediments with other's

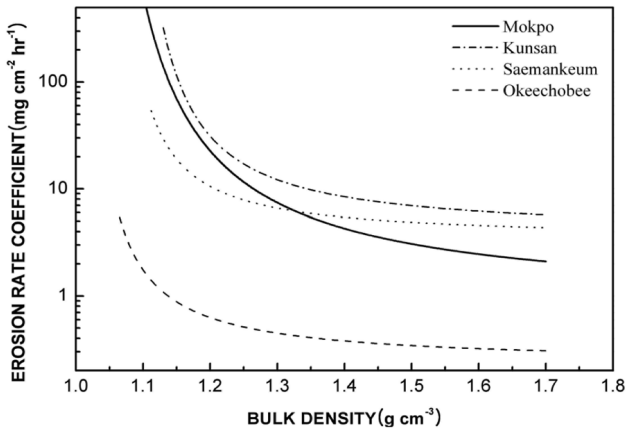


Fig. 8 Comparison of ϵ_M for Mokpo sediments with other's

2008) 및 Okeechobee호(Hwang and Mehta, 1989) 점착성 퇴적물의 침식특성 산정결과와 함께 Fig. 7 및 Fig. 8에 주어진다.

Fig. 7 및 Fig. 8은 각 지역 퇴적물별로 저면밀도 변화에 따른 τ_{ce} 와 ϵ_M 의 변화를 각각 보여주는데, τ_{ce} 및 ϵ_M 모두 각 지역별로 주어진 저면밀도 값에 대해 정량적으로 상당히 다른 값을 가짐을 알 수 있다. 일반적으로 저면의 기준밀도는 $1.20g/cm^3$ 로 여겨질 수 있는데, 이 밀도 조건에서 목포해역 점착성 퇴적물의 침식한계전단응력은 약 $0.2N/m^2$ 으로 군산 퇴적물과 거의 비슷한 값을 가지는 것으로 나타났으며, 새만금 퇴적물보다는 약 50% 작고, Okeechobee호 퇴적물보다는 약 3배나 작다. 침식률계수의 경우에는 정량적으로 훨씬 더 큰 차이를 보이는데, 저면 밀도 $1.20g/cm^3$ 의 조건에서 목포해역 점착성 퇴적물의 침식률계수는 약 $23mg/cm^2 \cdot hr$ 로서 군산 퇴적물과 유사한 값을 가지며, 새만금 퇴적물보다는 약 2배 크고, Okeechobee호 퇴적물보다는 무려 약 38배나 크다.

Mehta(1986), 류홍렬 등(2006) 등에 의해 논의된 바와 같이, 동일 저면밀도(ρ_b)조건 하에서 침식 매개변수 값들(τ_{ce} 및 ϵ_M)의 이러한 현저한 차이가 의미하는 바는, 점착성 퇴적물의 경우에 그 침식특성은 퇴적물 자체의 물리·화학적 기본특성 및 유체의 특성에 따라 지역적으로 크게 변화할 수 있다는 것이다. 이러한 사실은 타 지역 퇴적물의 침식특성 자료는 특정 지역에서의 점착성 퇴적물의 이동예측을 위한 수치모형실험을 위해 사용될 수 없다는 것을 나타내며, 침식한계전단응력 및 침식률계수 산출을 위한 현장관측이나 실내실험이 각 조사대상 지역에서 반복적으로 수행되어야 한다는 것을 의미한다.

5.3 물리·화학적 특성과의 상관관계

본 연구에서 침식특성의 지역적 변화 원인은 퇴적물 자체의 물리·화학적 특성과 연계하여 정성적으로 분석되었다. 앞서 Fig. 7 및 Fig. 8에 도식된 각 퇴적물들의 물리·화학적 특성비교는 Table 7에 요약되어 주어진다.

Table 7에서 알 수 있는 바와 같이, 목포해역 퇴적물의 평균 입경은 $33\mu m$ 로 군산 퇴적물과 유사하며, 새만금 퇴적물보다는 약 1.2배 작고, Okeechobee호 퇴적물보다 약 2.2배 큰 것으로 나타났다. 반면, 목포해역 퇴적물의 유기물 함량은 10% 이하로

Table 7 Comparison of physico-chemical properties of Mokpo sediments with other's

Properties item	Mokpo	Kunsan	Saemankeum	Okeechobee
Average grain size	33 μm	32 μm	41 μm	15 μm
Main mineralogical component	Quartz	Quartz	Quartz	Kaolinite
Organic contents	6%	3%	3%	40%

군산 및 새만금 퇴적물의 유기물 함량과 비슷한 수준인 것으로 나타났으며, 유기물 함량이 40%인 Okeechobee호보다 약 7배 정도 작다. 한편, 광물질 구성성분을 살펴보면, 목포해역 퇴적물은 군산 및 새만금 퇴적물과 동일하게 석영이 주된 광물이나, Okeechobee호 퇴적물은 고령토가 주된 광물질 성분이다.

일반적으로 점착성 퇴적물은 평균입경이 작을수록, 그리고 유기물 함량이 클수록 점착력이 증가하는 경향이 있다. 또한 광물학적 측면에서 보면, 보편적으로 점착성 퇴적물에 많이 함유되어 있는 고령토, Illite, 녹니석 등의 광물성 점토보다 석영이 훨씬 작은 점착력을 갖는다. 따라서, Okeechobee호 퇴적물보다 상대적으로 평균입경이 크고 유기물함량이 적으며, 비교적 점착력이 작은 석영을 주성분으로 하는 목포해역은 Okeechobee호 퇴적물보다 더 작은 점착력을 가질 것으로 판단된다. 일반적으로, 저면 퇴적물의 점착력이 더 크다는 것은 저면을 구성하고 있는 개개 토사입자의 결합력이 더 강하고, 결과적으로 흐름에 대한 저항력 즉, 저면의 전단강도가 더 크다는 것을 의미하므로, 목포해역 퇴적물이 상대적으로 큰 점착력을 갖는 Okeechobee호 퇴적물보다 작은 τ_{ce} 값을 갖는 한편, 더 큰 ϵ_M 값을 갖게 되었다고 해석될 수 있다.

한편, 목포해역 퇴적물과 군산 및 새만금 퇴적물간의 침식특성 차이는 앞서와 동일한 원리로 설명될 수 없는 것으로 보인다. 목포해역의 퇴적물의 평균입경은 군산 퇴적물의 평균입경과 거의 비슷하고, 새만금 퇴적물보다는 작은 값을 가지며, 유기물 함량은 군산 및 새만금 퇴적물보다 약 2배 많으므로 퇴적물의 점착력이 더 클 것으로 판단된다. 따라서, 목포해역 퇴적물은 군산 및 새만금 퇴적물보다 침식한계전단응력은 더 크고, 침식률계수는 더 작아야 하나, Fig. 7 및 Fig. 8에 제시된 결과는 이와는 매우 상이한 결과를 보여주고 있다.

본 연구에서는 퇴적물 자체의 물리·화학적 기본특성의 조사 항목으로 단지 입경분포, 유기물 함량 및 광물질 구성성분의 3가지 항목만을 고려하였는데, Mehta(1986)는 이 외에도 양이온전도율(Cation exchange capacity), 컨시스턴시 특성, 전단특성 등을 포함한 8가지 항목을 물리·화학적 기본특성 조사항목으로 제시한 바 있으며, Berlamont et al.(1993)은 생물학적 특성까지 포함된 총 28개의 항목을 필수 조사항목으로 제시하였다. 이러한 점에 비추어, 목포해역, 군산 및 새만금 퇴적물간의 침식특성 차이는 입경분포, 유기물 함량 및 광물질 구성성분의 3가지 항목 이외의 다른 항목에 의한 영향의 결과인 것으로 추정된다. 최근, 점착성 퇴적물의 이송 특성 해석과 관련하여, 점성계수로

대표되는 점착성 퇴적물의 기본 유동학적 특성(Rheological properties)의 중요성이 크게 부각됨에 따라 이에 대한 연구가 활발히 수행되고 있다(박용성, 2010; 김동호 등, 2010). 앞서 서론에서 제시된 바와 같이, 점착성 퇴적물의 이송특성은 입자간의 응집 현상에 의해 크게 영향을 받으므로, 입자간의 응집 강도를 나타내는 지표로 사용될 수 있는 점성계수 및 양이온전도율 등과 같은 인자들을 직접 측정하고 이와 연계하여 퇴적물의 침식특성을 해석하는 것은 매우 의미있는 사항이라고 판단된다. 결론적으로, Table 7에 제시된 입경분포, 유기물 함량 및 광물질 구성성분의 3가지 항목만으로 목포해역, 군산 및 새만금 퇴적물간의 침식특성 차이의 원인을 설명하는 것은 불가능한 것으로 여겨지며, 지역별 침식매개변수의 정량적 차이를 타당성 있게 해석하기 위해서는 퇴적물의 물리·화학적 특성 조사 항목으로 점성계수 및 양이온전도율 등과 같은 항목들을 추가적으로 포함시킬 필요가 있는 것으로 판단된다.

6. 결 론

본 연구에서는 목포해역 점착성 퇴적물의 침식특성을 정량적으로 산정하기 위하여 전북대 환형수조를 이용한 실내실험이 수행되었다. 침식실험은 목포 해역 내의 1개 정점에서 채취된 퇴적물 시료에 대해 총 5회 수행되었으며 각기 다른 밀도를 갖는 균일저면 조건하에서 수행되었다. 또한, 점착성 퇴적물의 침식특성은 퇴적물 자체의 물리·화학적 기본특성에 크게 영향을 받으므로, 이러한 퇴적물의 기본특성과 연계하여 목포해역 점착성 퇴적물의 침식특성이 조사되었으며, 타 지역의 결과와 비교·검토되었다.

침식실험 결과에 따르면, 저면밀도를 $1.14\sim 1.34\text{g}/\text{cm}^3$ 로 변화시켰을 때 침식한계전단응력(τ_c)은 $0.16\sim 0.43\text{N}/\text{m}^2$ 범위에서 로그함수적으로 증가되고, 침식률계수(ϵ_M)는 $272\sim 4.64\text{mg}/\text{cm}^2 \cdot \text{hr}$ 범위에서 지수함수적으로 감소하는 것으로 나타났다. 또한, 점착성 퇴적물의 침식특성은 지역적으로 현저한 차이를 보이는 것으로 확인되었는데, 목포해역 점착성 퇴적물의 침식한계전단응력은 새만금 및 Okeechobee호 퇴적물보다는 작고, 군산 퇴적물과 유사한 것으로 나타났다. 반면, 목포해역 퇴적물의 침식률계수는 새만금 및 Okeechobee호 퇴적물보다 크고, 군산 퇴적물보다 다소 작은 것으로 나타났다.

본 연구를 통하여 도출된 목포해역 점착성 퇴적물의 침식특성에 대한 정량적 결과들은 향후 목포해역에서의 수질 및 퇴적물 이송에 대한 수치모형 프로그램 시 요구되는 입력자료로 활용될 수 있을 뿐만 아니라, 해역 내 오염에 대한 대책방안 수립 및 저면의 침/퇴적에 따른 하상변동 해석 등 다양한 목적으로 크게 활용될 수 있을 것이다. 점착성 퇴적물의 침식특성은 현장 특성에 현저하게 의존하는 "Site-specific"한 특성을 가지므로, 황규남 등(2005), 류홍렬 등(2006)에 의해 강조된 바와 같이 해당 지역 퇴적물에 대한 침식특성 매개변수 산출을 위해서는 현장 관측이나 실내실험이 각 조사대상 지역으로 반복적으로 수행되어야 하겠다.

후 기

본 연구는 국토해양부의 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 해양환경보전기술개발사업 연구결과입니다.

참 고 문 헌

- 강주환, 문승록, 박선중 (2004). "해수유동모형에서 조간대 모의의 필요성", 대한토목학회 논문집, 제24권, 제3B호, pp 259-265.
- 강주환, 문승록, 박선중 (2005). "조석확폭에 수반되는 조간대영역 확대의 영향성", 한국해양·해양공학회지, 제17권, 제1호, pp 47-54.
- 국립수산진흥원 (1997). 해양환경공정시험방법 연구보고서, 한국해양학회.
- 김동호, 엔딘폭, 정의택, 황규남 (2010). "Fluid mud의 유동학적 특성에 관한 연구", 대한토목학회 학술발표회 논문집, CD1, pp 2347-2350.
- 류홍렬, 이현승, 황규남 (2006). "금강 하구역 점착성 퇴적물에 대한 침식률 매개변수의 정량적 산정", 한국해양·해양공학회지, 제18권, 제4호, pp 283-293.
- 문승록, 박선중, 강주환, 윤종태 (2006). "MIKE21 모형을 이용한 목포해역 해일/범람모의", 한국해양·해양공학회지, 제18권, 제5호, pp 492-501.
- 박용성 (2010). "점탄소성 모형을 이용한 연안하상 및 해저 점토퇴적층 거동모의", 한국수자원학회지, 제43권, 제9호, pp 74-77.
- 양수현, 황규남 (2008). "새만금 끝막이 공사 전후의 점착성 퇴적물의 침강특성 변화 해석", 한국해양공학회지, 제22권, 제4호, pp 20-26.
- 임상호, 류홍렬, 황규남 (2008). "금강하구역 점착성 퇴적물 침식특성의 지역적·계절적 변화해석", 대한토목학회 논문집, 제28권, 제1B호, pp 125-135.
- 황규남, 김태인 (2000). "하구역 퇴적현상 및 퇴적저감을 위한 일반적인 원칙", 한국수자원학회지, 제33권, 제3호, pp 61-67.
- 황규남, 김현민, 안익장 (2008). "새만금 인공호 점착성 퇴적물의 침식특성에 대한 실험적 연구", 한국수자원학회 논문집, 제41권, 제5호, pp 473-482.
- 황규남, 소상돈, 김태민 (2005). "미세-점착성 퇴적물의 침식률 산정을 위한 실험적 연구", 한국해양·해양공학회지, 제17권, 제2호, pp 119-128.
- American Society for Testing and Materials (1987). Annual Book of A,S,T,M. Standards, 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, pp 279-283.
- Berlamont, J., Ockendon, M., Toorman, E. and Winterwerp, J. (1993). "The Characterisation of Cohesive Sediment

- Properties", Coastal Engineering, Vol. 21, pp 105-128.
- 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.
- 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.
- Shields, A. (1936). "Anwendung der Ahnlichkeitsmechanik und Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung", Mitteil. Preuss. Versuchsanst. Wasser Erd. Schiffbau, Berlin, No.2.
-
- 2010년 12월 22일 원고 접수
 2011년 1월 6일 심사 완료
 2011년 1월 10일 게재 확정