

미세-점착성 퇴적물의 침식률 산정을 위한 실험적 연구 An Experimental Study for Estimation of Erosion Rate of Fine Cohesive Sediments

황규남* · 소상돈* · 김태민*

Kyu-Nam Hwang*, Sang-Don So* and Tae-Min Kim*

요 지 : 미세-점착성 퇴적물의 침식률 산정을 목적으로 국내 최초로 환형수조가 제작되었으며, 수조의 성능, 실험 방법 및 결과등에 대한 타당성 검증을 목적으로 고령토를 이용한 침식실험이 수행되었다. 각기 다른 밀도를 갖는 균일저면 조건하에서 총 4회의 실험이 수행되었으며, 이 결과로부터 점착성 퇴적물의 침식한계 전단응력과 침식률 계수가 산정되었다. 기존의 타 연구결과와의 비교·검토를 통하여, 본 연구에서 특수 제작된 환형수조는 성능상에 문제가 없음이 간접적으로 확인되었으며, 균일저면의 제작과정을 포함하는 침식실험 방법 및 실험 결과의 타당성이 입증되었다.

핵심용어 : 침식률, 미세-점착성퇴적물, 침식한계전단응력, 저면전단응력, 환형수조

Abstract : An annular flume has been constructed in order to estimate the erosion rate of fine cohesive sediments. Under an uniform bed condition, some erosion tests for Kaolinite sediments have been conducted to examine the performance of the flume and to check the validity of experimental method and results. In this study, the critical shear stress for erosion and the erosion rate coefficient are estimated and compared with the existing measurements. It is concluded that the performance of the annular flume is good enough to conduct erosion tests and the experimental method and results are valid.

Keywords : erosion rate, fine cohesive sediments, critical shear stress for erosion, bed shear stress, annular flume

1. 서 론

일반적으로 갯벌이라고 불리는 미세-점착성 퇴적물의 이동특성은 크게 침식특성과 퇴적특성의 2가지로 대표될 수 있으며, 이러한 이동특성들의 분석 및 예측시에 겪는 가장 큰 어려움은 그 퇴적물의 침식·퇴적 특성이 현장 특성(site-specific)에 현저하게 의존한다는데 있다. 이것은 타 지역에서 측정된 침식·퇴적 특성의 결과를 특정지역에 사용할 수 없다는 것을 의미한다. 즉, 수치모형실험을 통하여 미세-점착성 퇴적물의 이동을 정량적으로 예측하고자 할 경우, 침식·퇴적의 특성을 나타내는 모든 계수들은 실험이나 현장관측을 통하여 직접 구한 후에 수치모형의 입력 값으로 사용되어야 한다는 것을 의미한다.

최근 한국해양연구소와 공동으로 이정렬 등(2000)에 의해 수행된 영광해역에서의 미세-점착성 퇴적물의 이동에 대해 연구결과는 침식·퇴적 특성에 대한 관측결과와 결핍으로 인하여 비롯된 예측모형실험 수행의 어려움을 잘 나타내고 있으며, 침식·퇴적 특성에 대한 관측치의 필요성을 분명히 밝히고 있다. 그러나 국내에서 미세-점착성 퇴적물의 침식·퇴적 특성에 대한 실험 및 현장 관측은 매우 미미한 실정이며, 수치모형을 이용한 예측 실험시에 측정자료의 결핍으로 인하여 해외를 비롯한 일부 국내의 타 지역에서 관측된 값들을 편의적으로 사용하는 큰 오류를 범하는 사례가 빈번히 발생하고 있다.

특히, 미세-점착성 퇴적물의 침식은 항로수심 유지, 효율적인 준설 및 준설토의 외해 투기를 위해 필수적으로

*전북대학교 토목공학과·공업기술연구센터(Corresponding author: Kyu-Nam Hwang, RCIT·Dept. of Civil Engineering, Chonbuk National University, 664-14 1ga, Duckjin-dong, Duckjin-gu, Jeonju Jeonbuk 561-756, Korea. khwang@chonbuk.ac.kr)

조사되어야 할 중요한 인자로서, 지난 수십 년 동안 많은 학자들에 의해 다양한 방법으로 관측·분석되어져 왔다. 침식에 대한 최초의 연구들은 자연상태의 실트·점토의 저면 위로 일정한 염도를 갖는 해수를 부유사와 함께 순환 펌프로 재순환시키면서 주로 직선수조에서 수행되었다 (Thorn and Parsons, 1980; 김재중, 1989; 김차겸·이종섭, 1992). 그러나 미세·점착성 퇴적물의 제반 이동특성이 입자간의 응집현상에 의해 크게 지배된다는 점을 고려할 때, 응집된 부유토사들이 재순환 펌프의 날개에 의해 쉽게 분리될 수 있는 직선수조의 사용은 그 타당성이 의문시되고 있으며, 이러한 직선수조의 단점을 보완하기 위하여 고안된 환형수조의 사용이 실험방법 및 결과의 타당성 등의 측면에서 가장 선호되는 실험장치로 알려지고 있다(Maa, 1989; Krishnappan, 1993; 황규남·소상돈, 2002).

최근 전북대학교 해안·항만실험실에서는 미세·점착성 퇴적물의 침식을 산정을 목적으로 환형수조를 제작하였고, 이 환형수조를 이용하여 균일저면(uniform bed) 조건하에서 고령토 퇴적물의 침식률을 조사하였다. 본 연구의 궁극적인 목적은 균산해역 미세·점착성 퇴적물의 침식률을 파악하는 것이나, 제작된 환형수조의 성능 및 문제점 검토를 위한 예비실험과 침식실험 결과의 검증은 목적으로 고령토에 대한 실험이 우선적으로 선행되었다. 본 논문에서는 점착성 퇴적물의 침식률 산정을 위해 특수 제작된 환형수조의 구조적·수동학적 특성과 실험방법이 설명되어지고, 과거 연구와의 비교 및 검토를 통하여 환형수조를 이용한 본 침식실험 결과의 타당성이 검증된다.

2. 전북대 환형수조의 구조적·수동역학적 특성

2.1 제원 및 구조적 특성

본 연구를 위하여 제작된 환형수조의 설계는 미국 Florida 대학 Mehta 교수와 VIMS(Virginia Institute of Marine Science)의 Maa 교수와의 협의를 통하여 결정되었으며, 제작된 환형수조의 모습은 Photo 1에 주어진다. 사진으로부터 알 수 있는 바와 같이, 환형수조를 구성하는 2개의 주요 구조적인 장치는 물과 퇴적물을 담을 수 있는 환형모양의 수조몸체(annular channel)와 수조내에 거치되어 수면과 밀착될 수 있게 수조보다 약간 작은 폭을 갖는 상부의 회전링이다. 환형수조에서의 흐름은 기본적으로 수면과 접하여 회전하는 상부 회전링의 마찰력에 의해 생성되며, 끝없이 순환되는 균일한 흐름을 만들 수 있다는 장점을 갖는다. 그러나 환형수조는 원심력과 원주

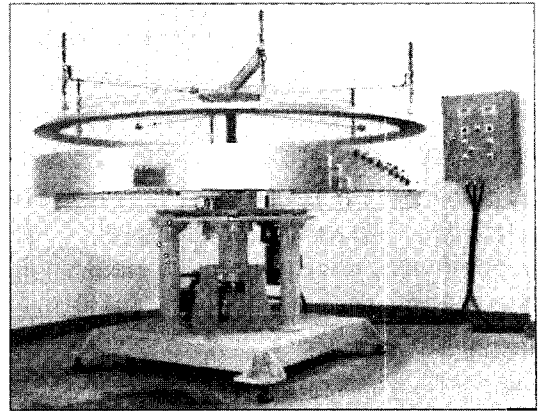


Photo 1. Annular flume in Chonbuk National University

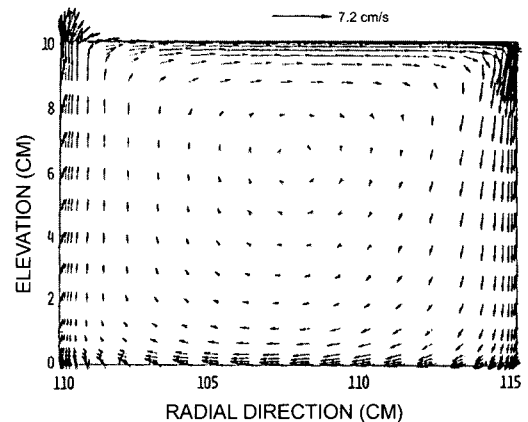


Fig. 1. Flow velocity vector in the annular flume (Maa, 1993).

속도(circumferential velocity)의 연직방향에서의 속도구배로 인한 2차 순환류(secondary flow)를 형성시켜 중심 축방향에서의 바닥전단응력(bed shear stress)을 비균등하게 하는 경향을 갖는다(Fig. 1참조). 바닥전단응력은 보통 수조의 내벽에서부터 외벽으로 갈수록 증가하는 경향이 있으며, 이는 수조의 내측보다 외측에서 더 많은 침식을 유발시킬 수 있다. 2차 순환류의 발생을 저감시키기 위한 방안으로는 환형수조 몸체를 상부 링의 회전방향과 역방향으로 직접 회전시키는 방법이 채택되어져 왔다. 한편, 상부 링만이 회전되는 경우에, 2차 순환류가 발생된다는 사실에는 논쟁의 여지가 없으나, 퇴적물 이동역학 측면에서 그 영향의 정도에 대해서는 아직 많은 논란이 있는 상태이다.

전북대 환형수조의 수조 몸체는 두께 2 mm의 스테인리스 스틸(STS)판으로 제작되었으며, 그 폭(w)은 15 cm이다. 또한, 수조몸체의 외측반경, 내측반경 및 수조높이

가 각각 115 cm, 100 cm 및 20 cm로 그 제원이 Maa(1989)의 환형수조와 동일하다. 그러나 Maa의 수조는 몸체가 고정되고 상부링만 회전하는 수조인 반면에 본 환형수조는 2차 순환류의 발생을 저감시키기 위하여 수조몸체도 회전하는 양방향 수조로 설계되었다. 전북대 환형수조의 기계적 제원 및 특성에 대한 세부적인 설명은 황규남·소상돈(2002)에 주어진다.

2.2 환형수조의 흐름특성

새로 제작된 수조에서의 흐름체계 분석을 위하여, 유속과 유량을 포함하는 흐름장과 저면전단응력을 직접 계측하고, 난류모델을 적용하여 수조내에서의 흐름장을 예측한 후에, 그 예측 값을 관측값과 비교·검토하는 것이 일반적인 원칙이다. 그러나 본 연구에서는 환형수조 내에서의 흐름구조에 대해 직접적인 관측과 해석이 이루어지지 않았으며, 대신에 제원이 동일한 수조는 흐름체계가 동일하다는 사실에 착안하여 기존의 타 연구결과를 활용하여 그 흐름특성을 분석하였다.

2.1절에서 언급된 바와 같이, 전북대 환형수조의 내·외측 반경과 높이는 Maa(1989)의 환형수조와 동일한 제원을 갖는다. 단지 두 수조간의 차이점은 Maa의 수조는 몸체는 고정(fixed bottom)되고 상부 링만 회전하는 수조인 반면에, 전북대 수조는 수조 몸체도 회전하는 양방향 회전수조로 설계된 점이다. 따라서, 상부 링만이 회전할 경우에 환형수조 내에서의 유속분포와 링 회전수에 따른 바닥전단응력은 두 수조가 동일하다고 할 수 있다.

Maa의 환형수조 내에서의 흐름특성에 대한 연구는 Maa(1993)와 Maa et al.(1995)에 의해 단계적으로 수행되었다. 우선적으로 Maa(1993)는 원통형 좌표계에서 단순화된 Reynolds 방정식과 연속방정식을 사용하여 수치적으로 환형수조 내의 2차 순환류를 모의하였으며(Fig. 1), 그 후 Maa et al.(1995)은 Hot-Film Stress Probe를 사용하여 바닥전단응력을 측정하고 모의결과와 비교·분석하여 다음과 같은 링 회전수와 바닥전단응력간의 관계식을 제시하였다.

$$\tau_b = 0.0114\Omega^{1.693} \quad (1)$$

여기서 Ω 와 τ_b 는 각각 환형수조의 링 회전수(rpm)와 수심 10 cm일 때의 바닥전단응력(Pascal)을 나타낸다. 전북대 환형수조는 Maa의 환형수조와 그 제원이 동일하므로, 환형수조 내에서의 흐름특성도 동일하다고 할 수 있으며, 상

부 링만 회전할 경우에 식 (1)은 전북대 환형수조의 링 회전수와 바닥전단응력간의 관계를 나타낸다고 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 식 (1)을 적용하여 바닥전단응력이 산정되었다.

3. 침식실험

3.1 퇴적물시료의 특성

본 침식실험에서 조성된 저면은 균일저면이며, 저면조성을 위해 사용한 시료는 고령토(Kaolinite)이다. 고령토는 미세-점착성 퇴적물의 이동특성 조사를 위한 실내실험시에 가장 널리 사용되는 점토 중의 하나로, 상용화되어 있어 구입이 용이한 장점을 갖는다. 본 실험에서 사용된 고령토의 성분적 특성에 대한 분석은 한국화학시험 연구원에 의하여 조사되었으며, 그 결과는 Table 1에 주어진다.

3.2 침식수의 특성

과거 점착성 퇴적물의 침식특성 연구에서는 그 연구 목적에 따라 염수, 중류수, 담수, 수돗물 등 다양한 종류의 침식수(erosing fluid)들이 사용되어 왔다. 본 연구에서 침식수의 특성에 따른 침식률 변화에 대한 연구는 본 연구의 목적을 벗어나므로, 단순히 사용이 용이한 수돗물을 침식수로 사용하였다. 본 연구에서 사용된 침식수의 화학적 성분의 함유량은 과거 한국수자원공사 충청권 수질검사에 의해 분석된 바 있다. 그 분석결과에 의하면, pH는 7.0이고, 각 화학성분들의 함유량은 Table 2와 같다.

3.3 실험방법

침식실험의 수행에 앞서, 균일저면의 조성을 위해, 우선, 일정량의 상용 고령토와 수돗물을 혼합하여 미리 설

Table 1. Characteristics of kaolinite sediments

시험항목	단위	결과치	시험방법
백색도	-	93.9	KSL 5113-97
SiO ₂	%	71.5	
Al ₂ O ₃	%	18.0	KSE 3805-96
Ig. loss(유기물함량)	%	5.70	
Fe ₂ O ₃	%	0.20	KSF 3805-96
CaO	%	2.40	(I. C. P)
MgO	%	0.05	
pH(20% 수용액)	-	8.50	KSF 2103-93
겉보기 비중	-	0.58	KSA 0602-95
입도(No. 325체 잔류분)	%	0	
수분	%	0.26	KSA 5301-95

Table 2. Chemical characteristics of tap water used as an eroding fluid

화학성분	함유량 (ppm)
Cl ⁻	11
NO ₃ -N	0.7
SO ₄ ²⁻	3
Zn	0.006
THMs	0.026
Chloroform	0.02

정된 저면 밀도를 갖는 고농도의 고령토 slurry가 준비되었다. 준비된 고령토 slurry 층은 전체 깊이에서 동일한 밀도와 강도를 갖도록, 믹서기와 에어펌프를 이용하여 혼합되었다. 혼합과정 중에 깊이별로 고령토 slurry의 밀도가 측정되었으며, slurry의 밀도가 거의 균일해질 때까지 혼합과정은 계속되었다. 본 실험에서 준비된 slurry 전체가 거의 균일한 밀도를 갖기까지 소요된 시간은 1일 평균 약 12시간의 혼합시간으로 약 1주 정도였다.

장기간 동안 충분히 혼합되어 균일한 밀도를 갖는 slurry는 환형수조 내로 옮겨져, 수조 전체에서 5 cm의 동일한 깊이를 갖도록 하였으며, 그 위로 수돗물을 저면으로부터 10 cm 높이까지 채워졌다. 균일저면 위로 수돗물을 채우는 과정에서 가능한 한 저면 퇴적물이 교란되지 않도록 각별한 주의가 기울여졌다. 수조 안에 저면층과 수층이 완전히 조성된 후, 환형 링의 높이를 조절하여 링이 수면에 충분히 접하도록 하였다. 저면에 가해지는 저면전단응력의 크기는 물 표면과 링 사이의 접촉 면적에 의존하므로 링을 수면에 밀착시키는 것은 매우 중요하다.

침식실험은 Parchure and Mehta(1985)와 Hwang and Mehta(1989)가 채택한 방법을 따라, 초기 저면전단응력을 0.1 또는 0.15 N/m²로 하여 6~7 단계로 0.1 N/m² 씩 저면전단응력을 증가시키는 방법으로 수행되었다. 각 단계별로 전단응력은 90분간 가해졌으며, 전단응력이 가해지고 있는 90분 동안 수조 내 수층의 탁수가 각각 0, 2, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 60, 75, 90분에 채워되었다. 탁수는 전체 수층에서의 평균 부유사 농도를 측정하기 위

해 수층의 각기 다른 2개의 높이에서 동시에 채취되었다.

수조 내 수층의 부유사 농도는 중량분석을 통하여 결정되었다. 중량분석을 통한 부유사 농도의 산정방법 및 중량분석을 위한 장비에 대한 설명은 각각 Hwang and Mehta (1989)와 이재연(2001)에 의해 자세히 주어진다. 한편, 주어진 전단응력 하에서의 시간에 따른 수층 부유사 농도 변화에 대한 분석으로부터 저면 퇴적물의 침식률이 산정될 수 있다. 또한 주어진 저면밀도에 대한 전단강도 혹은 침식한계 전단응력은 침식률과 저면전단응력 사이의 관계에서 도출될 수 있다(Hwang and Mehta, 1989).

3.4 실험조건

본 연구에서, 침식실험은 조성된 저면의 밀도를 변화시키면서 총 4회의 실험이 수행되었다. 모든 실험에서 수층의 깊이와 저면층의 두께는 각각 10 cm와 5 cm로 동일한 조건을 주었다. 각 실험별 침식실험 조건은 Table 3에 요약된다. 실험 #1은 저면의 부피밀도(ρ_B)와 함수비가 각각 1.67 g/cm³과 52.3%로 4개 실험 중에 저면밀도가 가장 큰 경우이며, 실험 #4는 밀도가 가장 작은 경우이다. 전체 실험을 통하여 저면밀도는 1.41~1.67g/cm³까지 변화하였으며, 함수비는 52.3~112.4%까지 변화하였다.

실험시에 저면에 가해진 초기전단응력과 최종전단응력 또한 Table 3에 주어진다. 초기전단응력은 0.1 N/m²으로 하고 단계별로 0.1 N/m²씩을 증가시키는 것을 원칙으로 하였으나, 실험 #1의 경우에는 저면 밀도가 비교적 큰 상태이기 때문에 뚜렷한 농도 변화가 발생토록 하기 위하여 초기전단응력을 조금 높여 0.15 N/m²으로 하였고 최종전단응력은 0.75 N/m²까지 되도록 하였다. 한편, 실험 #3과 #4의 경우에는, 비교적 작은 저면밀도로 인하여 각각 4단계와 3단계인 0.4 N/m²과 0.3 N/m²에서 저면의 구조적 붕괴현상이 발생하여, 더 큰 전단 응력을 가하는 것은 불가능하였다.

저면의 부피밀도(bulk density) 측정에서 측정상의 오차를 간접적인 방법으로 확인하기 위하여, 측정된 함수비를 부피밀도로 환산하여 기 측정된 부피밀도와 비교·검토하

Table 3. Experimental conditions

Test No.	ρ_B (g/cm ³)	함수비 (%)	수심 (cm)	저면 두께 (cm)	초기 전단응력 (N/m ²)	최종 전단응력 (N/m ²)	누적시간 (Min)
1	1.67	52.3	10	5	0.15	0.75	630
2	1.56	73.0	10	5	0.10	0.60	540
3	1.48	92.6	10	5	0.10	0.40	360
4	1.41	112.4	10	5	0.10	0.30	270

Table 4. Comparison between the measured bulk density and the converted one

Test No.	ρ_B (g/cm ³)	합수비 (%)	환산 (g/cm ³)
1	1.67	52.3	1.68
2	1.56	73.0	1.55
3	1.48	92.6	1.47
4	1.41	112.4	1.41

였다. Dyer(1986)에 의하면, 합수비와 부피밀도는 다음과 같이 주어진다.

$$\text{합수비}(\%) = \rho \left(\frac{1000}{C} - \frac{1}{\rho_s} \right) 100 \quad (2)$$

$$\text{Bulk Density } (\rho_B) = \rho + \frac{C}{1000} \frac{\rho_s - \rho}{\rho_s} \quad (3)$$

여기서 ρ 는 물의 밀도(1 g/cm³)이고, ρ_s 는 카올리나이트의 비중량(2.6 g/cm³), C는 퇴적물의 건조밀도 혹은 농도(g/L)이다.

측정된 합수비는 식 (2)와 (3)을 이용하여 부피밀도로 환산되었으며, 그 결과는 Table 4에 요약된다. 표로부터, 부피밀도의 측정치와 합수비로부터 환산된 환산부피밀도 사이에는 그 차이가 거의 없음을 알 수 있다. 따라서 본 연구를 통하여 측정된 부피밀도와 합수비 값은 비교적 정확한 값이라고 할 수 있다. 한편, 초기 5 cm의 저면 두께는 실험 중 장시간 침식으로 인하여 그 두께가 변화할 수 있으며, 이에 따라서 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 않을 지라도 전체 수조에서 합리적으로 균일한 저면전단응력을 얻을 수 있는 것으로 분석된 바 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 영향은 무시되었다.

균일저면을 이용한 침식실험시에 부각되는 또 하나의 의문사항은 최대 9시간의 침식실험 시간동안 조성된 저면에서의 압밀에 의한 저면 부피밀도의 변화의 정도이다. 이에 대한 검토는 황규남·소상돈(2002)의 저면밀도실험을 통하여 이루어졌다. 그 결과에 따르면, 시간에 따른 밀도의 변화는 9시간 후의 경우를 제외하고는 그다지 큰 변화를 보이지 않는 것으로 나타났으며, 높이에 따른 변화에 있어서도 9시간 후의 경우를 제외하고는 큰 변화가 발생하지 않는 것으로 해석되었다. 따라서 압밀에 의한 저면밀도의 증가가 저면 퇴적물의 침식률에 미치는 영향 또한 무시될 수 있다고 하겠다.

4. 결 과

4.1 시간에 따른 부유사 농도의 변화

각 실험별로 시간에 따른 수조 내 부유사 농도의 변화는 각각 Fig. 2에 주어진다. 균일저면의 경우에, 침식이 진행되는 동안 부유사 농도는 시간에 따라 선형적으로 증가하는데, 모든 결과는 이러한 현상을 잘 보여주고 있다. 특히 이러한 현상은 주어진 저면전단응력이 비교적 클 때 잘 나타나는 것으로 보인다. 그러나 Fig. 2(a)와 (b)의 경우에, 작은 저면전단응력에서 이러한 현상이 잘 나타나는 것 같지는 않다. 예를 들어 Fig. 2(a)를 자세히 살펴보면, 첫 단계의 저면전단응력 하에서 부유사 농도는 일시적으로 증가하다가 거의 균일하게 되는 경향을 보임을 쉽게 알 수 있으며, 이러한 경향은 두 번째 및 세 번째 단계에서도 나타난다. 부유사 농도 측정시에 발생할 수 있는 오류를 무시한다면, 이러한 경향은 실험과정상에 변화된 저면구조로부터 비롯된 결과라고 할 수 있다. 침식실험시에 수조 안에 저면을 조성한 후에 침식수를 채우는 과정에서 저면 상부 층이 일부 교란되었으며, 이 교란에 의해 균일저면의 표층은 사실상 퇴적저면으로 바뀌었을 것으로 여겨진다.

따라서 이 층이 침식되는 동안 부유사농도의 단위 시간당 변화율은 점차적으로 감소하여, 결국 각 전단응력의 끝 단계에서는 그 변화율이 0이 된 것이라고 할 수 있다. Villaret and Paulic(1986)과 Hwang and Mehta(1989) 또한 환형수조를 이용한 침식실험 수행시에 이와 같은 경향을 관찰한 바 있으며, 이러한 경향은 균일저면을 이용한 침식실험의 초기단계에서 나타난다고 하였다.

한편, 본 실험들을 통하여 관측된 또 하나의 중요한 사항은 붕괴침식(mass erosion)의 발생이다. 붕괴침식은 보통 저면전단응력이 클 때 발생하며, 저면밀도가 작은 저면이 구조적으로 파괴됨으로써 발생된다. 붕괴침식이 발생할 때의 부유사 농도 변화를 나타내는 대표적 예는 Fig. 2(d)에 주어진다. 주어진 저면전단응력이 단지 3번째 단계인 0.3 N/m²에서 부유사 농도는 매우 가파르게 증가하였는데, 이는 붕괴침식의 발생을 의미한다. 붕괴침식은 저면전단응력 뿐만 아니라 저면 전단응력의 단위 시간당 변화율에 의해서도 지배되는 것으로 여겨지며(Cervantes, 1987; Hwang and Mehta, 1989), 이러한 침식유형은 모든 실험에서 관찰되었다.

4.2 침식한계 전단응력(τ_{ce}) 및 침식률계수(ϵ_M)의 산정

각각의 주어진 저면전단응력에 대한 침식률(erosion rate

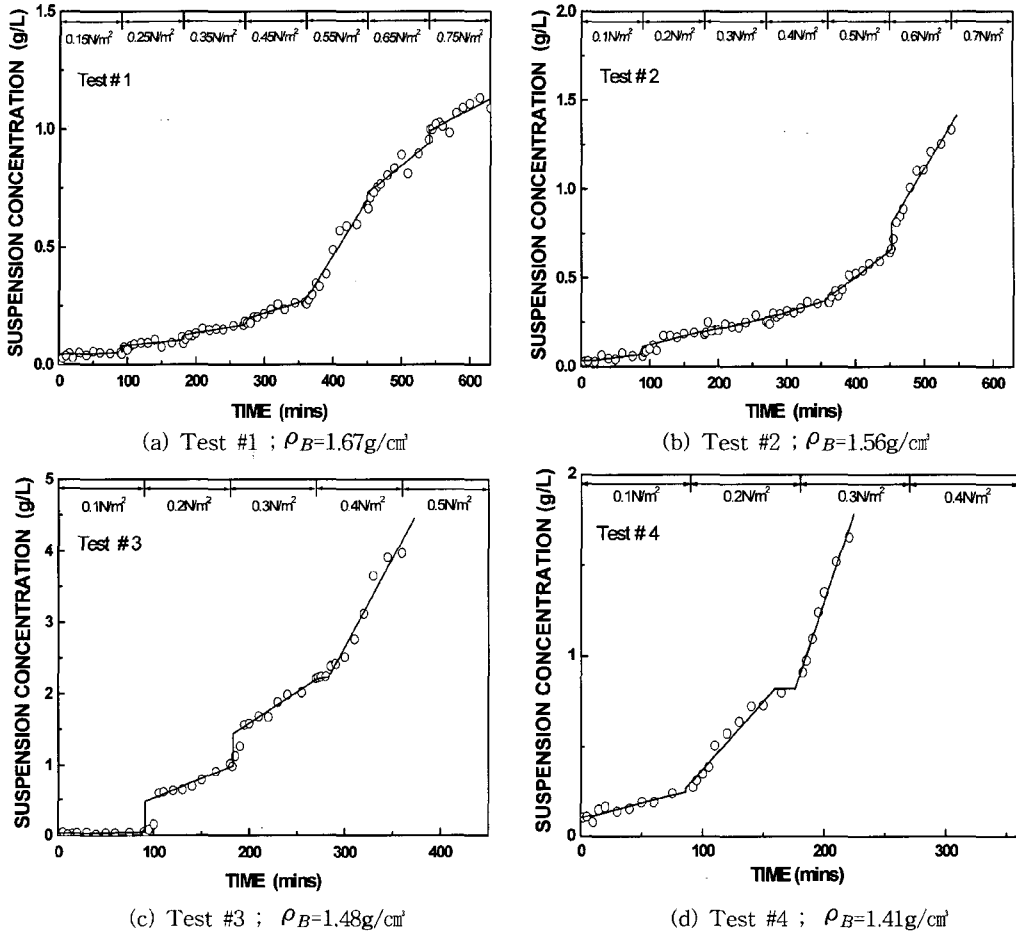


Fig. 2. Time-concentration variation.

또는 erosion flux)은 단위 면적 당 침식된 유사질량의 시간변화율을 전체 깊이에서의 부유사 농도의 시간변화율로 변환시킴으로써 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\varepsilon = \frac{\partial m}{\partial t} = h \frac{\partial C}{\partial t} \quad (4)$$

여기서 ε 은 침식률, m 은 단위 저면 표면적 당 침식된 유사량, 그리고 h 는 수심을 나타낸다.

예로써, 표면침식(surface erosion)에 의한 침식률을 구하기 위하여 Fig. 3에 주어진 결과를 이용하면, $\tau_b=0.6 \text{ N/m}^2$ 일 때 수심 $h=10 \text{ cm}$ 의 전 수심에 대해 1.5시간(Δt) 동안의 부유사 농도 차이(ΔC)는 0.57 g/L 로 계산된다. 식 (4)에 ΔC , Δt 및 h 를 대입하면, $\tau_b=0.6 \text{ N/m}^2$ 일 때 침식률은 $3.8 \text{ mg/cm}^2/\text{hr}$ 가 됨을 알 수 있다.

이러한 방법으로 각각의 저면전단응력에 대한 침식률

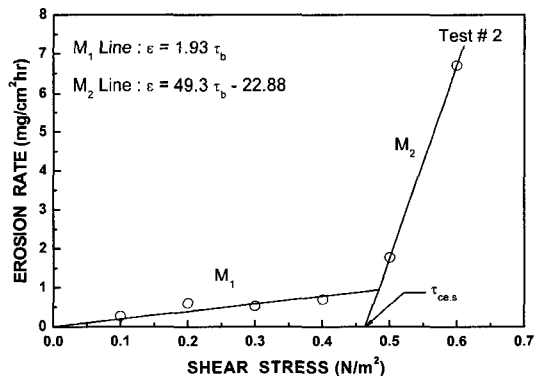


Fig. 3. Erosion rate variation with bed shear stress (Test #2 $\rho_B=1.56 \text{ g/cm}^3$).

이 산정되었고, 그 결과의 한 예가 Fig. 3에 주어진다. Fig. 3에서 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 전단 응력 하에서의 상부의 교란된 일부 퇴적저면의 침식을 나타내고, M_2 의 기울기는 상대적으로 큰 전단응력에서의 표면침식을 나타낸다. 상부의 일부 퇴적저면에서 침식된 유사량은 실제로 그다지 많지 않으므로, 본 연구의 목적상 여기서는 더 이상 논의되지 않는다.

균일저면에 대한 침식률 $\epsilon = F_e$ 는 다음과 같이 표현된다(Ariathurai and Arulanandan, 1978; Ariathurai and Krone, 1976).

$$F_e = \epsilon_M \left(\frac{\tau_b}{\tau_{ce}} - 1 \right) \quad (5)$$

여기서 ϵ_M 은 침식률 계수, τ_{ce} 는 침식한계 전단응력, 그리고 τ_b 는 저면전단응력을 나타낸다.

표면침식에 대한 침식한계 전단응력 $\tau_{ce,s}$ 는 접합곡선 M_2 를 황좌표 축까지 연장시켜 구해지며, 침식률 계수 $\epsilon_{M,s}$ 는 접합곡선 M_2 의 기울기와 $\tau_{ce,s}$ 를 곱하여 얻어진다. 각 실험별로 산정된 $\tau_{ce,s}$ 값과 $\epsilon_{M,s}$ 값은 저면의 부피밀도 및 함수비와 함께 Table 5에 주어진다.

붕괴침식(mass erosion)의 경우에, 그 침식한계 전단응력 $\tau_{ce,m}$ 은 붕괴침식이 발생할 때의 저면전단응력으로 간주할 수 있다. 그러나 붕괴침식에 대한 침식률 계수 $\epsilon_{M,m}$ 을 산정할 수 있는 합리적인 방법은 아직까지 제시되지 않은 상태이다. 따라서 Table 5에는 각 실험별로 산정된 $\tau_{ce,m}$ 만이 주어진다.

4.3 저면밀도가 침식률에 미치는 영향

저면 밀도(ρ_B)가 점착성 퇴적물의 침식특성을 나타내는 두 매개변수 τ_{ce} 와 ϵ_M 에 미치는 영향을 알아보기 위해 각 매개변수와 ρ_B 간의 관계가 조사되었으며, 그 결과는 각각 Fig. 4와 5에 주어진다. 그림들은 두 매개변수 τ_{ce} 와 ϵ_M 가 각각 저면밀도 ρ_B 와 상관성이 매우 크며, 일반적으로 ρ_B 가 증가할 때, τ_{ce} 는 증가하나 반면에 ϵ_M 은 감소하는 경향이 있음을 보여준다.

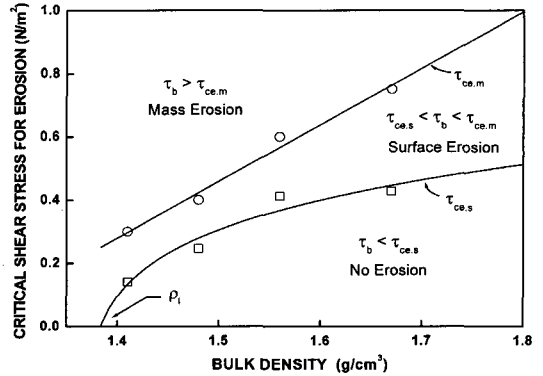


Fig. 4. Variation of critical shear stress (τ_{ce}) according to bed bulk density (ρ_B).

Fig. 4는 침식한계 전단응력과 ρ_B 간에 산정된 최적접합곡선을 보여주는데, 표면침식과 붕괴침식에 대한 최적접합곡선은 각각 식 (6)과 (7)에 주어진다. 접합곡선의 상관 계수 R^2 값은 표면침식의 경우 0.94이고, 붕괴침식의 경우에는 0.99인 것으로 나타났다.

$$\tau_{ce,s} = a_s(\rho_B - \rho_l)^{b_s} + c_s; \text{ surface erosion} \quad (6)$$

$$\tau_{ce,m} = a_m\rho_B + b_m; \text{ mass erosion} \quad (7)$$

여기서 $a_s=1.184$, $b_s=0.173$, $c_s=-0.498$, $a_m=1.791$, $b_m=-2.228$ 이고, 저면과 액상이토층(fluid mud layer) 사이의 경계밀도를 나타내는 ρ_l 은 최적접합곡선에 의하면 1.37 g/cm^3 로 산정되었으나, 과거 Hwang and Mehta(1989)에 의해 산정된 바와 같이 이 값은 vane전단시험을 통하여 검증될 필요가 있다. 한편, 식 (6)은 과거 Owen(1970)이 제시한 식 $\tau_{ce} = a\rho_B^b$ 과 유사한 형태를 갖는 것으로 보인다. 반면에 식 (7)은 과거에 표면침식에 대한 식으로 제시된 바 있는 $\tau = a\rho_B + b$ 와 동일한 형식이다(Mehta et al., 1982; Villaret and Paulic, 1986).

Fig. 5는 ρ_B 와 ϵ_M 의 관계를 보여주는데, 최적접합곡선의 상관계수는 약 0.63정도로 다소 상관성이 떨어진다. 산정된 접합곡선식은 식 (8)에 주어진다. 상관계수 값이 작

Table 5. Values of ρ_B , $\epsilon_{M,s}$, $\tau_{ce,s}$ and $\tau_{ce,m}$

Test No	ρ_B (g/cm ³)	함수비(%)	$\epsilon_{M,s}$ (mg/cm ² -hr)	$\tau_{ce,s}$ (N/m ²)	$\tau_{ce,m}$ (N/m ²)
1	1.67	52.3	13.35	0.43	0.75
2	1.56	73.0	22.88	0.46	0.6
3	1.48	92.6	28.31	0.25	0.4
4	1.41	112.4	75.20	0.19	0.3

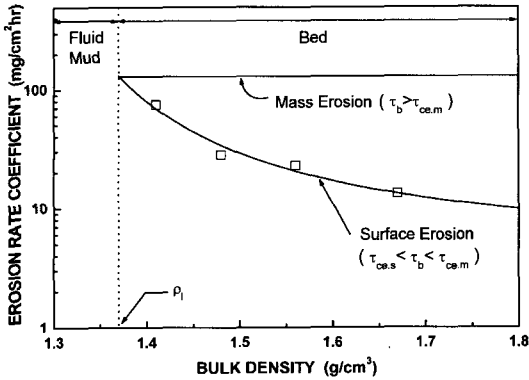


Fig. 5. Erosion rate coefficient (ϵ_M) variation with bed bulk density (ρ_B).

은 이유는 관측자료가 많지 않기 때문인 것으로 여겨지므로, 더 많은 실험분석이 수행될 필요가 있음을 나타낸다. 한편, 저면과 액상이토층 사이의 경계밀도를 의미하는 ρ_1 의 밀도를 1.37 g/cm^3 라고 가정하여 붕괴침식시의 침식을 계수 값을 산정하였으며, 이는 식 (9)에 주어진다.

$$\log \epsilon_{M,s} = s_1 \exp \frac{s_2}{\rho_B - \rho_3} ; \text{ surface erosion} \quad (8)$$

$$\epsilon_{M,s} = m_1 ; \text{ mass erosion} \quad (9)$$

여기서 $s_1=0.73$, $s_2=0.408$, $m_1=160$ 이며, ρ_3 는 액상이토층과 침식수 사이의 경계밀도 값을 의미한다. 식 (8)에서 ρ_3 값으로는 Hwang and Mehta(1989)가 사용한 값과 동일한 1.0023 g/cm^3 를 사용하였다. 과거 Hwang and Mehta(1989)는 침강플럭스가 최대가 될 때의 부유사 농도가 ρ_3 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 바 있다.

4.4 타 연구결과와의 비교검토

본 연구를 통하여 산정된 고령토 퇴적물의 침식특성(즉, $\tau_{ce,s}$ 과 $\epsilon_{M,s}$) 측정결과의 타당성 검토를 목적으로, 본 연구의 결과와 과거의 타 연구결과와의 비교·검토가 이루어졌다. 과거에, 자연시료에 대한 침식실험 연구는 많이 수행된 반면에, 고령토 시료에 대한 연구는 예상과는 달리 많지 않은 상태이다. 고령토로 조성된 균일저면에 대한 침식실험 연구들 중에 대표적인 예는 Christensen and Das(1973)와 Villaret and Paulic(1986)의 연구이다. Christensen and Das(1973)는 특수장치인 Drill-hole을 이용하여, 저면 밀도가 각각 1.84 g/cm^3 와 1.86 g/cm^3 인 2개 균일저면에

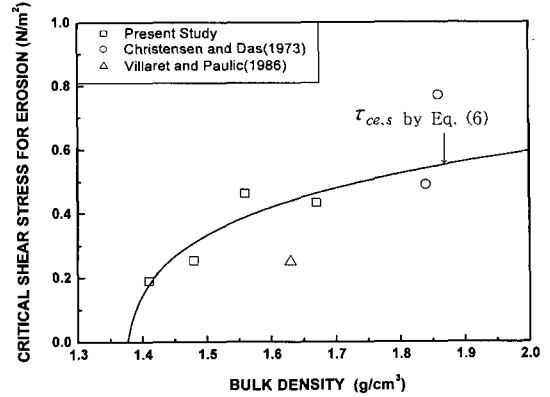


Fig. 6. Comparison of critical shear stress for erosion.

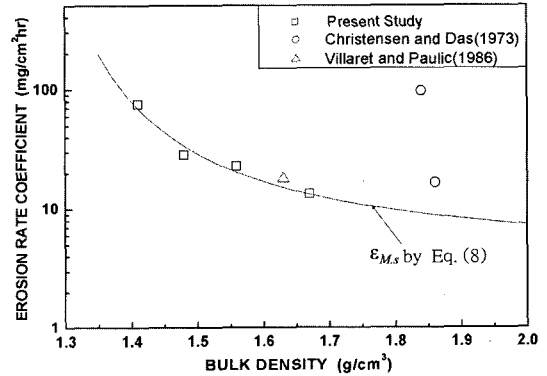


Fig. 7. Comparison of erosion rate coefficient.

서 수돗물에 의한 침식실험을 수행하였다. 한편, Villaret and Paulic(1986)은 환형수조에서 침식실험을 수행하였으며, 이 경우에 염도가 10 ppt인 침식수가 사용되었으며 균일저면의 밀도는 1.63 g/cm^3 이었다. 이 두 연구들로부터 도출된 균일저면에서의 고령토 퇴적물의 $\tau_{ce,s}$ 및 $\epsilon_{M,s}$ 값들은 실험조건들과 함께 Table 6에 요약되며, 또한 이 값들은 비교·검토를 목적으로 본 연구를 통하여 도출된 결과들과 함께 Fig. 6과 7에 각각 도식된다.

Fig. 6은 침식한계 전단응력 $\tau_{ce,s}$ 에 대한 비교를 보여주는데, Christensen and Das(1973)의 저면밀도 1.86 g/cm^3 에서의 $\tau_{ce,s}$ 값이 본 연구의 결과와는 비교적 큰 차이를 보이는 하나, 전반적으로 본 연구의 결과는 이 두 연구 결과들과 비교적 잘 일치함을 알 수 있다.

한편, Christensen and Das(1973)가 제시한 $\tau_{ce,s}$ 값들을 자세히 살펴보면, 비록 입경이 $2 \mu\text{m}$ 보다 작은 입자의 함량에서 9%의 차이가 있기는 하나, 저면밀도의 차는 단지 0.04 g/cm^3 로 거의 동일함에도 불구하고, $\tau_{ce,s}$ 값에

Table 6. Experimental conditions and results in the previous studies

연구자	Test No.	ρ_{B_3} (g/cm ³)	함수비 (%)	염도 (ppt)	시료 특성	ϵ_{M,S_2} (mg/cm ² ·hr)	τ_{ce,s_2} (N/m ²)
Christensen and Das(1973)	1	1.84	35.0	0	고령토 53% < 2 μ m	97.0	0.49
	2	1.86	33.0	0	고령토 62% < 2 μ m	16.6	0.77
Villaret and Paulic(1986)	1	1.63	59.2	10	고령토	18	0.25

서 상당한 차이를 보이는 것은 납득하기 어려운 결과이다. 따라서 두 결과 중의 하나에서 실험 수행시 혹은 분석시의 오류가 있었을 가능성이 커 보이는데, 본 연구 결과에 비추어 저면밀도 1.86 g/cm³에서의 $\tau_{ce,s}$ 값에 오류가 있었을 것으로 여겨진다. 또한, 이들은 환형수조가 아닌 특수장치인 Drill-hole을 사용하였다는 점을 고려할 때, 이러한 추정에는 더욱 타당성을 갖는다.

Villaret and Paulic(1986)의 경우에는, 저면밀도 1.63 g/cm³에서 $\tau_{ce,s}$ 값이 본 연구 결과보다 약간 작기는 하나 잘 일치하는 것으로 보인다. 그러나 Table 6에서 알 수 있는 바와 같이, 이들의 연구는 염도 10 ppt인 침식수에서 수행되었고 본 연구는 수돗물에서 수행되었다는 점을 고려할 때, 이 또한 매우 흥미로운 결과이다. 일반적으로 염도가 증가할 때, $\tau_{ce,s}$ 값은 증가하는 경향이 있다.

침식을 계수 $\epsilon_{M,S}$ 에 대한 비교는 Fig. 7에 주어진다. 앞서와 마찬가지로, Christensen and Das(1973)에 의한 두 $\epsilon_{M,S}$ 값 중에 1개 값만이 본 연구 결과와 비교적 큰 차이를 보이고, 이 외의 값들은 본 연구 결과와 잘 일치함을 알 수 있다. 특히, 일반적으로 염도의 증가가 $\epsilon_{M,S}$ 값의 감소를 초래한다는 점을 고려할 때, 본 연구 결과보다 조금 작은 값을 보이는 Villaret and Paulic(1986)에 의한 $\epsilon_{M,S}$ 값은 본 연구 결과와 매우 잘 일치하는 값이라고 할 수 있다.

이러한 과거 연구와의 비교·검토 결과에 비추어, 본 연구를 통하여 산정된 고령토 퇴적물의 침식특성 즉, 침식한계 전단응력 τ_{ce} 와 침식률 계수 ϵ_M 값들은 비교적 타당성 있는 값들이라고 할 수 있다. 또한 간접적으로, 이러한 결과는 본 연구를 통하여 제작된 환형수조가 그 성능에 있어 문제가 없으며, 균일저면의 제작과정을 포함하는 침식실험 방법 또한 타당함을 의미한다고 할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 미세-점착성 퇴적물의 침식을 산정을 목적으로 국내 최초로 제작된 환형수조를 이용하여 고령토에 대한 침식실험이 수행되었다. 총 4회의 침식실험이 각기 다른 밀도를 갖는 균일저면 조건하에서 수행되었으며, 이

결과를 이용하여 점착성 퇴적물의 침식한계 전단응력과 침식률 계수의 산정방법이 수립되었다. 또한 산정된 고령토 퇴적물의 침식한계 전단응력과 침식률 계수들은 과거 타 연구결과와 비교·검토되었다.

본 침식실험 결과에 따르면 저면밀도 1.41~1.67 g/cm³ 구간에서 고령토의 침식한계 전단응력은 0.14~0.42 N/m²까지 작은 밀도에서는 빠르게 그리고 큰 밀도에서는 느리게 증가하는 성향을 보였으며, 반면에 고령토의 침식률 계수는 저면밀도가 증가함에 따라 로그 함수적으로 8.34~24.15 mg/cm²/hr 범위에서 감소하는 경향을 보였다. 이것은 저면밀도가 증가함에 따라 침식한계 전단응력이 증가하고, 침식을 계수는 감소함을 보여주는 과거의 많은 타 연구결과와 잘 일치하는 결과이다.

또한, 본 침식실험에서는 붕괴침식의 발생이 관찰되었다. 붕괴침식에 대한 해석 방법은 아직 정립되지는 않은 상태이나, Hwang and Mehta(1989)의 방법을 따라 해석한 결과, 붕괴침식의 한계전단응력 또한 저면밀도가 증가함에 따라 증가하였으며, 그 침식률 계수는 160 mg/cm²/hr인 것으로 나타났다. 한편, 과거 타 연구 결과와의 비교·검토를 통하여 침식한계 전단응력과 침식률 계수에 대한 본 연구의 결과는 매우 타당한 결과임이 확인되었다. 특히, 본 연구결과는 환형수조를 이용하여 실험을 수행한 Villaret and Paulic(1986)의 연구결과와 매우 잘 일치하는 것으로 나타났다. 이러한 검증된 실험결과에 비추어, 결론적으로 본 연구를 통하여 제작된 환형수조는 그 성능상에 문제가 없으며, 균일저면의 제작과정을 포함하는 침식실험 방법 및 실험결과는 정량적·정성적으로 타당성을 갖는다고 하겠다.

한편, 본 연구에서는 균일저면에 대한 침식률 산정만이 수행되었는데, 퇴적저면에 대한 침식을 산정은 향후 연구 과제로 남겨진다. 또한, 본 연구에서는 수조 내 부유사 농도 측정시, 재래식 방법인 water sampling을 통한 중량분석이 이뤄졌으나, OBS(Optical Backscatter Sensor)와 같은 광학기기들을 이용하여 흐름을 교란시키지 않은 상태에서 부유사 농도를 측정함으로써, 정밀도를 향상시킬 필요가 있다. 마지막으로, 본 연구에서 사용된 환형수조는

양방향 회전 기능을 갖추고는 있으나, 양방향 회전시의 수조내의 흐름특성에 대한 분석은 수행되지 않은 상태로, 효율적인 사용 및 정밀도 향상을 위하여 양방향 회전시의 환형수조 내의 흐름체계 분석이 요구된다.

감사의 글

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

참고문헌

- 김재중 (1989). 점성토의 침식 및 퇴적에 관한 실험적 연구. 박사학위논문, 서울대학교.
- 김차겸, 이종섭 (1992). 미세퇴적물의 부상특성에 관한 연구. 대한토목학회논문집, 12(3), 221-229.
- 이정렬, 이동영, 황인태 (2000). A prediction of cohesive sediment transport in Young-Kwang area. 한국수자원학회 학술발표회 논문집, 905-910.
- 이재연 (2001). 새만금 해역 갯벌 퇴적물의 침강 특성에 관한 연구. 석사학위 논문, 전북대학교.
- 황규남, 소상돈(2002). 환형수조를 이용한 미세-점착성 퇴적물의 침식특성 조사. 한국수자원학회 학술발표회논문집, 1075-1080.
- Ariathurai, R. and Arulanandan, K. (1978). Erosion rates of cohesive soils. *J. Hyd. Div., ASCE*, 104, HY2, 279-283.
- Ariathurai, R. and Krone, R.B. (1976). Finite element model for cohesive sediment transport. *J. Hyd. Div. ASCE*, 102, HY, 323-338.
- Cervantes, E.E. (1987). A laboratory study of fine sediment resuspension by Waves. MS Thesis, Univ. of Florida, Gainesville, FL.
- Christensen, R.W. and Das, B.M. (1973). Hydraulic erosion of remolded cohesive soils. Special Report 135, Highway Research Board, Washington D.C., 8-19.
- Dyer, K.R. (1986). Coastal and estuarine sediment dynamics. A Wiley-Interscience Publication, Chapter 8.
- Dyer, K.R. (1995). Geomorphology and sedimentology of estuaries. *Development in Sedimentology* 53 edited by G.M.E. Perillo., Publisher; Elsevier Science., Chapter 14.
- Hwang, K.-N. and Mehta, A.J. (1989). Fine-sediment erodibility in Lake Okeechobee. Florida, UFL/COEL-89/019, Coastal and Oceanographic Engineering Dept., UF, Gainesville, Florida.
- Krishnappan, B.G. (1993). Rotating circular flume, *J. Hyd. Engineering, ASCE*, 119(6), 758-767.
- Maa, J.P.Y. (1989). The bed shear stress of an annular sea-bed flume. *Water Quality Management*. Hamburg, Germany. 271-276.
- 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, 265-280.
- Maa, J.P.Y., Lee, C.-H. and Chen, F.J. (1995). Bed shear stress measurement for vims Sea Carousel. *Mar. Geol.*, 129, 129-136.
- Mehta, A.J., Partheniades, E., Dixit, J.G. and McAnally, W.H. (1982). Properties of deposited kaolinite in a long flume. *Proc. of Hydraulics Div. Conference on Applying Research to Hydraulic Practice*, ASCE, Jackson, Mississippi.
- Owen, M.W. (1970). A detailed study of the settling velocities of an estuary mud. *Hydraulics Research Station*. Wallingford, England, Report No. INT 78, September.
- Parchure, T.M. and Mehta, A.J. (1985). Erosion of soft cohesive sediment deposits, *J. Hyd. Engineering, ASCE*, 111(10), 1308-1326.
- Thorn, M.F.C. and Parsons, J.G. (1980). Erosion of cohesive sediments in estuaries: an engineering guide. *Proc. 3rd Int. Symp. Dredging Technology*, England, 349-358.
- Villaret, C. and Paulic, M. (1986). Experiments on the erosion of deposited and placed cohesive sediments in an annular flume and a rocking flume. Report No. UFL/COEL-86/007, Coastal and Oceanographic Engineering Department, Univ. of Florida, Gainesville, FL.

Received March 17, 2005

Accepted June 15, 2005