

새만금 인공호 점착성 퇴적물의 침식특성에 대한 실험적 연구

A Laboratory Study on Erosional Properties of Fine Cohesive Sediments from Saemankeum Artificial Lake

황 규 남* / 김 현 민** / 안 익 장***

Hwang, Kyu-Nam / Kim, Hyun Min / Ahn, Ik Jang

Abstract

The purpose of this study is to quantitatively estimate the erosional properties for cohesive sediment from Saemankeum artificial lake. A series of erosion tests were conducted with Chonbuk annular flume, which is the first one constructed in this country and verified with validities. Each erosion tests were conducted under a uniform bed condition but a different bed density respectively, and its critical shear stress for erosion(τ_{ce}) as well as the erosion rate coefficient (ϵ_M) were determined quantitatively. Since the erosional properties of the cohesive sediments vary largely depending in the physico-chemical properties, such properties of Saemankeum sediments were also estimated and their effects on the erosional properties were analyzed. For Saemankeum sediments, it can be seen that τ_{ce} increases from 0.26N/m^2 to 0.52N/m^2 and ϵ_M decreases exponentially from $14.28\text{mg/cm}^2 \cdot \text{hr}$ to $6.02\text{mg/cm}^2 \cdot \text{hr}$, as the bed density varies from 1.17g/cm^3 to 1.34g/cm^3 . The erosional parameters of Saemankeum sediments are found to be remarkably different in quantity as compared with those for cohesive sediments from other sites. Particularly, τ_{ce} for Saemankeum sediments is known to be larger than that of Kunsan sediments but similar with that of Shihwa sediments, while ϵ_M for Saemankeum sediments is shown to be smaller than that for Kunsan sediments.

keywords : cohesive sediments, erosion, physico-chemical properties, annular flume, critical shear stress for erosion, erosion rate coefficient

요 지

본 연구의 목적은 최근 끝막이 공사가 완료된 새만금 인공호 점착성 퇴적물의 침식특성을 정량적으로 분석하는 것이다. 침식실험은 국내 최초로 제작되고 그 타당성이 검증된 전북대 환형수조를 이용하여 각기 다른 밀도를 갖는 균일저면 조건하에서 수행되었으며, 새만금 인공호 점착성 퇴적물의 침식한계전단응력 및 침식률계수가 정량적으로 산정되었다. 한편, 일반적으로 점착성 퇴적물의 침식특성은 퇴적물의 물리·화학적 기본특성에 따라 크게 변화하

* 전북대학교 공과대학 토목공학과 부교수

Associate prof., Dept. of Civil Eng., Chonbuk National Univ., Jeonbuk 561-756, Korea,
(e-mail: khwang@chonbuk.ac.kr)

** 전북대학교 대학원 토목공학과 석사

Master of Engineering, Dept. of Civil Eng., Chonbuk National Univ., Jeonbuk 561-756, Korea
(e-mail: unitydream@chonbuk.ac.kr)

*** (주)헤인 이엔씨 이사

Director, Doctor of Engineering, Hyein E&C, Seoul 150-057, Korea
(e-mail: ahnij@hyein.com)

로, 새만금 인공호 점착성 퇴적물의 이러한 특성 또한 조사되었으며, 이와 연계하여 침식특성이 해석되었다. 새만금 인공호 점착성 퇴적물의 경우에, 저면밀도 $1.17\sim 1.34\text{g/cm}^3$ 범위에서 침식한계전단응력은 $0.26\sim 0.52\text{N/m}^2$ 로 로그함수적으로 증가하였으며, 침식률계수는 $14.28\sim 6.02\text{mg/cm}^2\cdot\text{hr}$ 범위로 지수함수적으로 감소하였다. 산정된 침식 매개변수들은 타 지역 점착성 퇴적물과 또한 비교/분석되었으며, 그 값은 정량적으로 지역마다 크게 다른 것으로 나타났다. 특히 새만금 인공호 점착성 퇴적물의 침식한계전단응력은 군산해역 퇴적물보다는 크며, 시화호 퇴적물과는 유사한 것으로 나타났으며, 반면에 새만금 인공호 퇴적물의 침식률계수는 군산해역 퇴적물보다는 작은 것으로 나타났다.

핵심용어 : 점착성 퇴적물, 침식, 물리·화학적 특성, 환형수조, 침식한계전단응력, 침식률계수

1. 서 론

새만금 방조제 및 시화 방조제와 같은 대규모 제방 건설 사업을 통하여 조성된 인공호소는 배수갑문을 통한 제한된 배수체계 및 해수호의 담수화 과정으로 인하여 준 평형상태로 유지되고 있는 동역학적·환경적·생태학적 역학관계가 파괴되고, 이로 인하여 환경적 측면에서 많은 문제점이 파생될 수 있다는 것은 이미 잘 알려진 사실이다. 과거 시화호에서의 경험을 통하여 쉽게 인식될 수 있는 바와 같이, 인위적으로 조성된 호소에 널리 분포되어 있는 점착성 퇴적물의 침식 및 퇴적(혹은 침강)과 관련하여 발생하는 문제점들 중의 하나는 수질(water quality)과 저면 경계층(benthic boundary)과 관련된 문제들이다. 예를 들어, 침식으로 인하여 저면 퇴적물이 수층으로 과다하게 부유하게 되면, 높은 탁도의 수층은 태양 빛의 투과능을 저하시키고, 결과적으로 수층 내 생태계에 큰 영향을 미쳐 생물학적 생산성을 저하시킬 수 있으며, 이는 호소에서의 수질오염의 주원인이 된다. 또한, 점착성 퇴적물은 부유 혹은 용해상태의 여러 가지 독성을 가진 오염물질과 쉽게 결합하는 특성이 있어, 오염물질과 결합된 부유토사가 침강·퇴적되어 바다의 퇴적층을 형성하게 되며, 호소 저층의 표층퇴적물 오염의 주원인이 된다. 따라서, 이러한 수질 오염 및 표층퇴적물 오염과 관련된 문제들에서 점착성 퇴적물의 침식·퇴적특성에 대한 해석 및 예측은 필수적으로 요구된다.

일반적으로 점착성 퇴적물의 침식현상은 표면침식(surface erosion)과 붕괴침식(mass erosion)의 두 가지 형태로 구분될 수 있다. 표면침식은 저면으로부터 입자들이 떨어져서 수층 내로 부유되기 쉽도록 상호간의 결합력들이 깨어진 형태로, 개개 입자별로 침식되는 현상이며, 붕괴침식은 보통 저면전단응력(bed shear stress)이 클 때에 저면밀도가 작은 저면이 구조적으로 파괴됨으로서 발생한다.

침식을 유발하는 원천적인 힘은 흐름에 의한 바닥전

단응력(τ_b)이라 할 수 있으나, 저면 퇴적물이 지니는 저항력(resistive force) 또한 침식의 정도를 조절하는 중요한 변수이다. 퇴적물이 갖는 이 저항력은 전단강도(shear strength) τ_s 라 불리며, 그 크기는 광물질구성 성분, 함수비, 공극비, 염도, 퇴적물의 형성과정 등에 따라 변화한다. 퇴적물의 전단강도는 종종 침식한계전단응력(critical shear stress for erosion)으로 표현되기도 한다.

이러한 점착성 퇴적물의 침식특성 조사를 위한 연구는 주로 수조를 이용한 실험적 방법으로 수행되어 왔다. 침식 매개변수 산정을 위한 최초의 실험적 연구들은 주로 직선수조에서 수행되었다(Alishahi and Krone, 1964; Dash, 1968; Thorn and Parsons, 1980). 그러나 직선수조에서는 재순환 펌프의 날개 및 수조 끝단에서의 자유낙하에 의해 응집된 토사들이 쉽게 분리될 수 있어 그 타당성이 의문시되어 왔으며(Krishnappan, 1993), 이러한 단점을 보완하기 위하여 환형수조가 고안되었다. 환형수조는 재순환 펌프를 필요로 하지 않으며, 시간의 제약 없이 흐름조건을 동일하게 만들 수 있다는 큰 장점을 갖는다. 한편, 이 외에도 점착성 퇴적물의 침식실험을 위한 수조로는 경수로 수조(race-track flume), 흔들수조(rocking flume) 등이 시도된 바 있으나, 환형수조가 현재까지의 실험방법 및 결과의 타당성 등의 측면에서 가장 선호되는 실험장치로 알려지고 있다(Fukuda and Lick, 1980; Maa, 1989; Krishnappan, 1993).

본 연구의 대상 해역인 새만금 인공호는 2006년 4월 최종 끝막이 공사가 완료된 상태로, 향후 호소 내부의 수질 관리방안 수립과 방수호안 축조 등의 내부개발에 따른 환경적·생태학적 변화에 대한 평가 및 예측이 필수적으로 요구되는 수역이다. 따라서 앞서 설명된 바와 같이, 이를 위해서는 호소 저층에 널리 분포되어 있는 점착성 퇴적물의 침식·퇴적 특성에 대한 정량적 평가 및 해석이 선행적으로 수행되어질 필요가 있다. 새만금 점착성 퇴적물의 침강특성은 비록 끝막이 공사 이전에

라 하더라도, 과거 황규남(2000) 등에 의해 조사된 바 있다. 그러나, 침식특성에 관한 연구는 거의 전무한 상태로, 이에 대한 구체적인 연구는 필수적이면서도 매우 시급한 사항이다.

본 연구에서는 국내 최초로 제작되고 타당성이 검증된 전북대 환형수조를 이용한 실내 침식실험을 통하여, 새만금 인공호 점착성 퇴적물의 침식특성이 정량적으로 산정되었으며, 과거 타 지역 퇴적물의 침식특성 결과와 비교·검토되었다. 또한 본 연구에서는 새만금 인공호 점착성 퇴적물의 물리·화학적 특성이 정량적으로 분석되었는데, 이러한 특성들과 침식특성간의 정성적 상관관계 해석을 통하여, 새만금 인공호 점착성 퇴적물의 침식특성 산정결과와 타당성이 간접적으로 검토되었다.

본 연구를 통하여 도출된 새만금 인공호 점착성 퇴적물의 침식특성에 대한 정량적·정성적 결과들은 향후 새만금 해역에서의 수질 및 표층퇴적물 이송에 대한 수치모형 프로그램 시 요구되는 입력 자료로 사용될 수 있을 뿐만 아니라, 해역 내 오염에 대한 대책 방안 수립 및 저면의 침식과 퇴적에 따른 하상변동 해석 등 다양한 목적으로 크게 활용될 수 있을 것이다.

2. 현장 표본 채취

새만금 인공호 점착성 퇴적물의 침식특성 조사를 위한 퇴적물 표본 시료는 1개 정점(지점 #1)에서 동계시(2007년 2월 13일)에 채취되었다. 퇴적물은 채취기(Grab sampler)를 이용하여 채취되었으며, 현장 해수 조건을 반영하기 위하여 동일 지점에서 또한 해수가 채취되어 침식실험의 전 과정에서 사용되었다. 퇴적물 표본시료의 채취 위치는 Fig. 1에 주어지며, 채취 지점의 경위도 좌표와 채취당시의 수온, 염도 및 관측수심에 따른 부유사 농도의 크기 또한 Table 1에 주어진다.

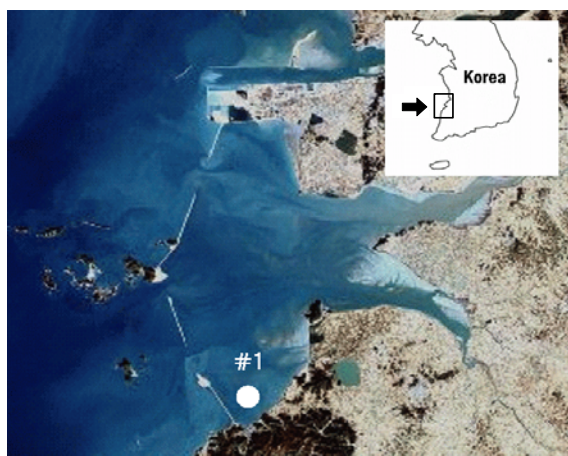


Fig. 1. Location of Sediment Sampling in Saemankeum Artificial Lake

3. 새만금 퇴적물의 물리·화학적 특성

점착성 퇴적물은 침식·퇴적 등의 모든 이송과정에서 여러 입자가 응집되어 형성된 플록의 형태로 이송되므로, 입자간의 응집은 점착성 퇴적물의 이송특성을 지배하는 주요 인자 중의 하나가 된다. 한편, 입자간의 응집은 개개의 입자가 갖는 고유 크기의 점착력에 따라 달라지며, 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 필수적인 사항이다. 본 연구에서는 새만금 인공호에서 채취된 표본 퇴적물 시료의 물리·화학적 특성 조사를 위한 목적으로 입경분포, 유기물 함량 및 광물질 구성성분의 3가지 항목에 대한 조사·분석이 수행되었다.

3.1 입경분포

새만금 인공호 퇴적물의 입경분포는 체분석과 비중계 분석법을 병행하여 분석되었다. 우선적으로, No.200 체를 기준으로 wet-sieving 방법으로 분리하여 No.200 체를 통과한 시료에 대해서는 비중계 분석이 수행되었고 체에 남은 시료에 대해서는 체분석이 실시되었다. 비중계 분석시의 시료의 전처리 과정에 대한 자세한 설명은 류홍렬·황규남(2006)에 주어진다. 체분석과 비중계 분석을 통하여 산정된 새만금 인공호 퇴적물 표본시료에 대한 입경특성 및 입경분포 곡선은 타 지역에서의 결과들과 함께 Fig. 2 및 Table 2에 주어진다.

Fig. 2에 보이는 바와 같이 새만금 인공호의 퇴적물은 Okeechobee호 퇴적물보다 조립하고, 과거 시화호 퇴적물(류홍렬, 황규남, 2006)보다는 훨씬 더 세립한 분포를 보이며, 전체적으로 군산해역 퇴적물과 유사한 분포를 가지는 것으로 나타났다. 또한 Table 2에 제시된 결과에서 알 수 있는 바와 같이, 새만금 인공호 퇴적물의 점토의 함량은 7%로서 Okeechobee호 퇴적물(32%)에 비해 상대적으로 점토의 함량이 매우 적으며, 시화호의 경우와 유사한 것으로 나타났다.

3.2 유기물 함량

본 연구에서 새만금 인공호 퇴적물의 유기물 함량은 해양환경공정시험방법(국립수산진흥원, 1997)에 따라 강열감량법으로 분석되었다. 새만금 인공호 퇴적물의 유기물 함량 산정 결과는 타 지역 퇴적물에 대한 결과들과 함께 Table 3에 주어진다. 표에서 알 수 있는 바

Table 1. Basic Information of Sampling Site and Sea Water used as an Eroding Fluid

| Site | N | E | Depth (m) | Observation depth | Temperature (°C) | Salinity (%) | Concentration (mg/L) |
|------|----------------|------------------|-----------|----------------------------------|------------------|--------------|----------------------|
| #1 | 35° 43 ' 5.5 " | 126° 33 ' 35.1 " | 8m | upper layer(H _{2/10}) | 7.5 | 26.1 | 0.04 |
| | | | | middle layer(H _{6/10}) | 7.7 | 26.0 | 0.04 |
| | | | | lower layer(H _{8/10}) | 7.5 | 26.2 | 0.04 |
| | | | | depth-average | 7.6 | 26.1 | 0.04 |

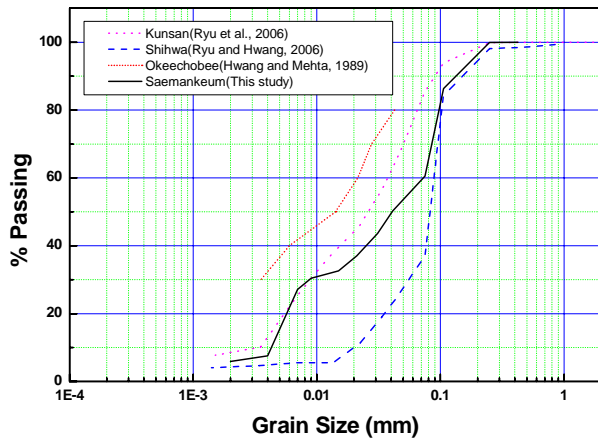


Fig. 2. Comparison of Grain Size Distribution

Table 2. Comparison of Sand, Silt and Clay Contents

| Site | sand(%) (d>62.5) | silt(%) (62.5>d>4) | clay(%) (d<4) |
|------------|---------------------|-----------------------|------------------|
| Saemankeum | 42 | 51 | 7 |
| Shihwa | 67 | 28 | 5 |
| Kunsan | 22 | 65 | 13 |
| Okeechobee | - | 68 | 32 |

Table 3. Comparison of Organism Content

| Site | % of organic contents |
|------------|-----------------------|
| Saemankeum | 3 |
| Shihwa | 6 |
| Kunsan | 3 |
| Okeechobee | 40 |

Table 4. Comparison of mineralogical compositions

| rank | Saemankeum | rank | Shihwa | rank | Kunsan | rank | Okeechobee |
|------|---------------------------------|------|-----------------------|------|-----------|------|--|
| 1 | 석영(Quartz) | 1 | Quartz | 1 | Illite | 1 | Kaolinite |
| 2 | 장석(Feldspar) 미사장석(Albite) | 2 | Albite | 2 | Kaolinite | etc. | Montmorillonite Sepiolite Quartz |
| 3 | 일라이트(Illite) | 3 | Illite | 3 | Chlorite | | |
| 4 | 고령토(Kaolinite) 녹니석(Chlorite) | 4 | Kaolinite Chlorite | 4 | Smectite | | |

와 같이, 새만금 인공호 퇴적물의 유기물 함량은 3%로 근산해역의 유기물 함량과 동일한 것으로 나타났으며, 유기물 함량이 40%인 Okeechobee호와는 약 13배 정도의 차이가 있음을 알 수 있다.

3.3 광물질 구성 성분

새만금 인공호 퇴적물 표본시료에 대한 광물질 구성 성분 분석은 전북대학교 공동시험소가 보유하고 있는 회절분석기(x-ray diffraction)를 이용하여 수행되었다. 본 연구에서는 광물질 구성성분의 정량적인 분석은 수행되지 않고, 단지 정성적인 분석만이 수행되었으며, 그 결과는 타 지역의 결과들과 함께 Table 4에 주어진다. 표에 주어진 바와 같이, 새만금 인공호 점착성 퇴적물의 광물질 구성성분은 내림차순으로 석영, 장석, 미사장석, 일라이트, 고령토, 녹니석 등이 지배적인 성분인 것으로 나타났으며, 이러한 양상은 시화호 퇴적물의 분석 결과와 거의 유사한 것으로 나타났다.

4. 침식실험

저면은 보통 퇴적저면(Deposited Bed)과 균일저면(Placed Bed)의 2가지로 대표되는데, 이들 사이의 중요한 차이점은 침식에 대한 점성강도의 수직분포에 있다 (Parchure and Mehta, 1985). 퇴적저면의 경우에, 나중에 퇴적된 유사는 응집력이 작아데 반해 먼저 퇴적된 유사는 그 보다 더 크며, 대조적으로 균일저면은 수직방향으로 비교적 균일한 저면특성을 가진다.

수직방향에서의 저면구조에 따른 침식특성의 변화는

Fig. 3에 제시되는 두 개의 일반화된 형태로 표현될 수 있다. 그림에서 Type1과 Type2는 각각 균일저면과 퇴적저면에서 침식이 발생할 경우에 시간에 따른 부유사량의 변화, 특히 침식률의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 쉽게 알 수 있듯이, 균일저면에서는 시간에 따른 부유사량의 증가율(dc/dt) 즉 침식률이 일정하나, 퇴적저면의 경우에는 침식률이 시간에 따라 감소하여 최종적으로는 침식률이 "0"이 되는 평형상태에 도달함을 알 수 있다.

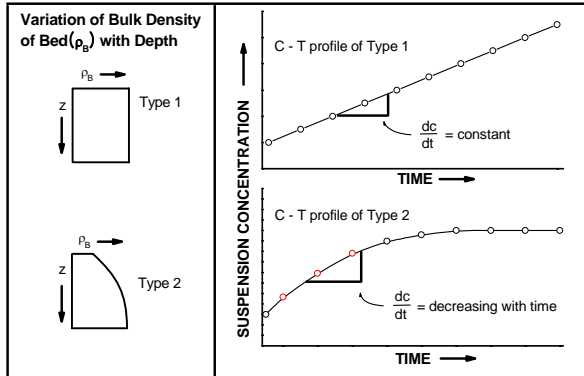


Fig. 3. Erosion Properties according to Structural Property of Bed (Parchure, 1984)

본 연구에서 새만금 인공호 점착성 퇴적물에 대한 침식실험은 균일저면 조건으로 수행되었다. 일반적으로, 균일저면에서 침식률(erosion rate)은 다음과 같이 표현된다(Ariathurai and Arulanandan, 1978).

$$\varepsilon = \varepsilon_M \left(\frac{\tau_b}{\tau_{ce}} - 1 \right) \quad (1)$$

여기서 ε_M 은 침식률 계수, τ_{ce} 는 침식한계전단응력 또는 저면전단강도 τ_b 는 흐름에 의해 바닥면에 가해지는 바닥전단응력을 나타낸다.

본 연구에서 침식실험을 위한 실험장치로는 Fig. 4에 주어지는 전복대 환형수조가 사용되었다. 본 수조는 점착성 퇴적물의 침식률 산정을 목적으로 국내 최초로 제작된 국내 유일의 환형수조로, 황규남 등(2005), 류홍렬, 황규남(2006), 류홍렬 등(2006)에 의해 수조의 성능, 침식실험 방법 및 실험결과 등에 대한 타당성 검증이 수행된 바 있다.

황규남 등(2005)은 각기 다른 저면밀도를 갖는 균일저면 조건하에서 총 4회의 실험을 수행하여 고령토 점착성 퇴적물의 침식한계전단응력과 침식률계수를 산정하였으며, 기존의 타 연구결과와의 비교·검토를 통하

여 그 타당성을 입증하였다. 또한, 그 이후 류홍렬·황규남(2006)과 류홍렬 등(2006)은 각각 본 환형수조를 이용하여 자연 퇴적물인 시화호 및 금강하구역의 점착성 퇴적물에 대한 침식한계전단응력과 침식률계수를 정량적으로 산정하고 그 특성을 규명하였다.



Fig. 4. Annular Flume (Hwang et al., 2005)

본 연구에서 침식실험은 새만금 인공호 1개 지점 (Fig. 1 참조)에서 동계시에 채취된 1개 시료에 대해 수행되었다. 침식실험시 저면조건은 균일저면이 채택되었으며, 조성된 균일저면의 밀도 ρ_B 를 1.17 g/cm^3 부터 1.34 g/cm^3 까지 변화시켜가며 총 4회의 실험이 수행되었다. 모든 실험에서 수층의 깊이와 저면층의 두께는 각각 10 cm와 5 cm로 동일한 조건이 적용되었으며, 퇴적물이 채취된 정점과 동일한 정점에서 채취된 해수가 실험 전체 과정에서 침식수(eroding fluid)로 사용되었다.

각 실험별 침식실험 조건은 Table 5에 주어진다. 침식 실험에서 흐름에 의한 바닥전단응력 조건은 초기값으로 0.1 N/m^2 이 적용되었으며 단계별로 0.1 N/m^2 씩 증가된 값이 적용되었다. 한편, 최종 바닥전단응력은 각 실험별로 저면 밀도의 조건에 따라 $0.3 \sim 0.7 \text{ N/m}^2$ 로 다르게 적용되었다. 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, 90분에 채취되었다. 탁수는 전체 수층에서의 평균 부유사 농도를 측정하기 위하여 수층의 각기 다른 2개의 높이에서 동시에 채취되었으며, 그 평균값이 실험결과 해석 시에 사용되었다. 침식실험 방법에 대한 자세한 사항은 황규남 등(2005)에 주어진다.

4.1 시간에 따른 부유사 농도의 변화

침식실험은 각기 다른 밀도의 균일저면 조건 하에서

Table 5. Experimental Conditions in Erosion Tests

| Test No. | ρ_B (g/cm ³) | depth (cm) | bed thickness (cm) | initial shear stress (N/m ²) | final shear stress (N/m ²) |
|----------|-------------------------------|------------|--------------------|--|--|
| 1 | 1.34 | 10 | 5 | 0.1 | 0.7 |
| 2 | 1.29 | 10 | 5 | 0.1 | 0.6 |
| 3 | 1.25 | 10 | 5 | 0.1 | 0.5 |
| 4 | 1.17 | 10 | 5 | 0.1 | 0.3 |

Table 6. Estimation of Erosion Rate Calculation for Test #3

| step | τ_b (N/m ²) | a | ΔC (mg/cm ³) | Δt (hour) | h (cm) | ε (mg/cm ² · hr) |
|------|------------------------------|----------|----------------------------------|-------------------|--------|---|
| 1 | 0.1 | 1.49E-04 | 0.013 | 1.5 | 10 | 0.089 |
| 2 | 0.2 | 1.95E-04 | 0.018 | 1.5 | 10 | 0.117 |
| 3 | 0.3 | 3.57E-04 | 0.032 | 1.5 | 10 | 0.214 |
| 4 | 0.4 | 5.82E-04 | 0.052 | 1.5 | 10 | 0.349 |
| 5 | 0.5 | 4.67E-03 | 0.420 | 1.5 | 10 | 2.802 |

각각 수행되었는데, 우선적으로 수조 내 부유사 농도의 시간적 변화 그래프가 각 저면밀도별로 각각 작성되었다. 한 예로 Test #3의 경우에 작성된 부유사 농도의 시간변화도가 Fig. 5에 주어진다. Test #3은 저면밀도 ρ_B 가 1.25 g/cm³인 경우인데, Fig. 5는 침식이 진행되는 동안 수심 평균된 부유사 농도가 시간에 따라 선형적으로 증가하는 현상을 잘 보여주고 있다.

각각에 주어진 저면전단응력에 대한 침식률(erosion rate)은 단위 면적당 침식된 유사질량의 시간변화율을 전체 깊이에서의 부유사 농도의 시간변화율로 변환시킴으로써 얻을 수 있으며, 이러한 변화는 다음과 같이 표현된다.

$$\varepsilon = \frac{\partial m}{\partial t} = h \frac{\partial C}{\partial t} \quad (2)$$

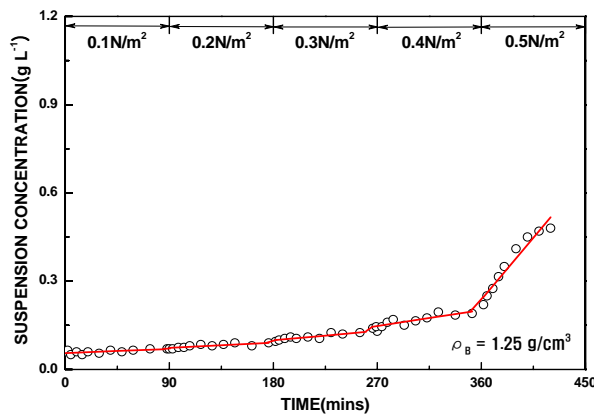


Fig. 5. Time-concentration Variation (Test #3)

여기서, ε 은 침식률, m 은 단위 저면 표면적 당 침식된 유사량, 그리고 h 는 수심을 나타낸다. Eq. (2)를 이용한 각 저면전단응력에 대한 침식률 산정결과는 Table 6에 주어진다.

4.2 침식한계전단응력 및 침식률계수

각 실험별로, 침식한계전단응력과 침식률계수를 산정하기 위하여, 각 바닥전단응력에 대한 침식률 데이터로부터 침식률 곡선이 도출되었으며, 한 예로 Test #3에 대한 결과가 Fig. 6에 주어진다. 그림에서 2개의 접합곡선 M_1 과 M_2 가 산정되었는데, M_1 은 작은 바닥전단응력에서 상부의 교란된 일부 퇴적저면(fluff)의 침식을 나타내고, 접합곡선 M_2 는 상대적으로 큰 바닥전단응력에서의 표면침식을 나타낸다. fluff침식으로

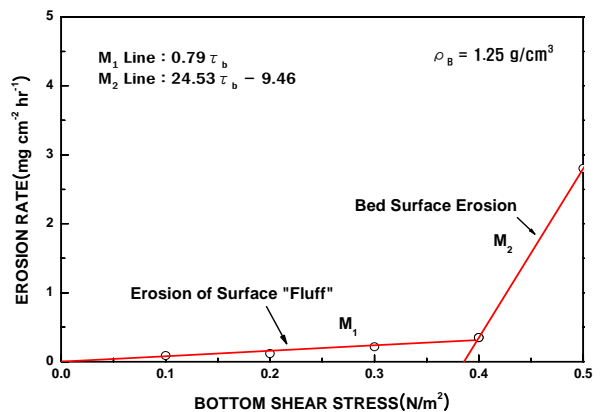


Fig. 6. Erosion Rate Variation with τ_{ce} for Test #3

인한 상부의 일부 퇴적저면에서 침식된 유사량은 실제로 그다지 크지 않으므로, 본 연구에서 더 이상의 논의는 생략된다.

침식률계수 ε_M 는 점합곡선 M_2 의 기울기와 τ_{ce} 를 곱하여 얻어지며, 각 실험별로 산정된 τ_{ce} 값과 ε_M 값은 저면밀도 값과 함께 Table 7에 주어진다.

Table 7. Values of ρ_B , ε_M , and τ_{ce} for Each Test

| Test No. | ρ_B (g/cm ³) | ε_M (mg/cm ² ·hr) | τ_{ce} (N/m ²) |
|----------|-------------------------------|--|---------------------------------|
| 1 | 1.34 | 5.03 | 0.534 |
| 2 | 1.29 | 7.49 | 0.486 |
| 3 | 1.25 | 9.46 | 0.386 |
| 4 | 1.17 | 12.68 | 0.192 |

5. 침식특성 해석

5.1 저면밀도의 영향

저면밀도(ρ_B)가 점착성 퇴적물의 침식특성을 나타내는 두 매개변수 τ_{ce} 와 ε_M (Table 7 참조)에 미치는 영향을 알아보기 위하여 각 매개변수와 저면밀도간의 관계가 조사되었으며, 그 결과는 Fig. 7과 Fig. 8에 주어진다. 그림으로부터 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

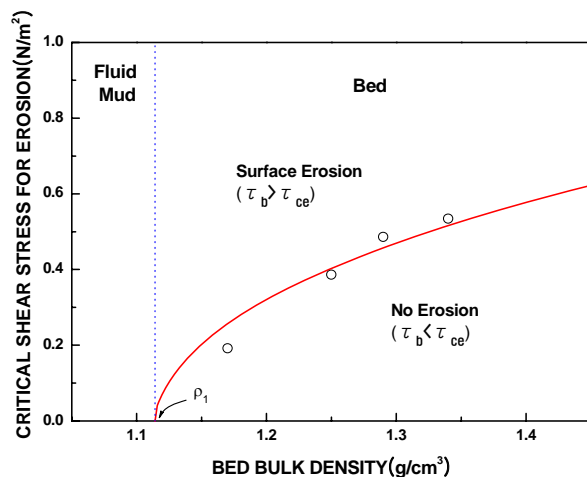


Fig. 7. Variation of Critical Shear Stress for Erosion, τ_{ce} with Bed Bulk Density

있음을 명확히 알 수 있다. 일반적으로, 저면밀도가 증가하게 되면 입자간의 응집력이 향상되고 저면이 지나는 전단강도가 증가하게 되며, 주어진 바닥전단응력, 즉 흐름력에 대한 저면의 저항력이 향상되어 침식한계전단응력은 증가되는 반면에 침식률계수는 감소하게 된다. 따라서, 이러한 점을 고려할 때에, Figs. 7 and 8에 주어지는 새만금 인공호 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 Eqs. (3) and (4)를 적용하였다.

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

$$\log \varepsilon_M = s_1 \exp \frac{s_2}{\rho_B - \rho_3} \quad (4)$$

Eqs. (3) and (4)의 침식한계전단응력 및 침식률계수에 대한 산정식들은 퇴적물의 기본특성에 따라 변화하는 임의의 계수 a , b , c 및 s_1 , s_2 , 그리고 저면과 액상 이토층의 경계에서의 퇴적물 밀도를 나타내는 ρ_l , 그리고 액상이토층과 수층 경계에서 부유사 농도의 밀도 값을 나타내는 ρ_3 를 포함한다.

Eqs. (3) and (4)를 적용하여 최소자승점합법으로 구한 침식한계전단응력 및 침식률계수에 대한 산정식들은 Figs. 7 and 8에서 각각의 점합곡선으로 주어지며, 각 점합곡선에 대한 a , b , c 및 s_1 , s_2 , 값은 Table 8에 주어진다.

한편, 침식률계수 산정식에서 Hwang and Mehta

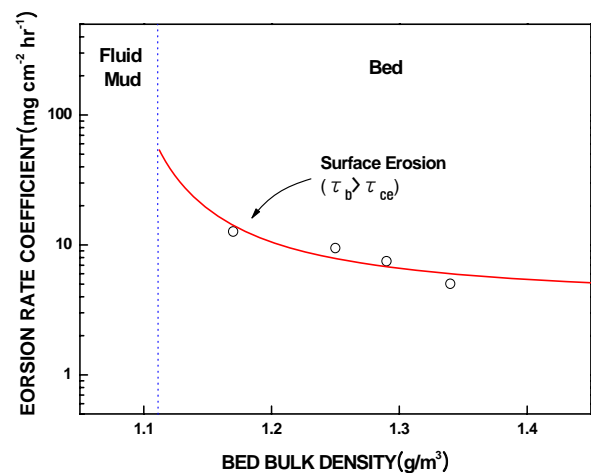


Fig. 8. Variation of Erosion Rate Coefficient, ε_M with Bed Bulk Density

Table 8. Values of Parameters in Eqs.(3) and (4)

| <i>a</i> | <i>b</i> | <i>c</i> | <i>s</i> ₁ | <i>s</i> ₂ |
|----------|----------|----------|-----------------------|-----------------------|
| 1.1200 | 0.4100 | -0.0970 | 0.5300 | 0.1300 |

(1989)는 ρ_3 가 침강플럭스가 최대가 될 대의 부유사 농도와 일치한다고 가정하였는데, 본 연구에서는 ρ_3 값으로 이들이 사용한 1.0023 g/cm^3 이 적용되었다. 또한, 저면과 액상이토층(fluid mud layer)의 경계에서의 퇴적물 밀도를 나타내는 ρ_1 값으로 Hwang and Mehta(1989)는 vane전단강도가 "0"이 될 때의 저면밀도와 동일한 것으로 가정하였으며, 이러한 가정에 근거하여 류홍렬 등(2006) 또한 군산해역 퇴적물에 대해 저면밀도 및 vane 전단강도를 측정하고 두 변수간의 상관관계 해석을 통하여 ρ_1 값으로 1.13 g/cm^3 을 산정하고 적용한 바 있으나, 본 연구에서는 접합곡선 산정시의 최적 값인 1.11 g/cm^3 이 적용되었다.

5.2 타 지역 점착성 퇴적물의 연구결과와의 비교

새만금 인공호 점착성 퇴적물의 침식특성을 나타내는 두 매개변수 τ_{ce} 와 ϵ_M 에 대한 본 측정결과와 과거 타 지역 점착성 퇴적물들에 대한 관측값과의 비교·검토를 통하여 점착성 퇴적물의 침식특성의 지역적 변화에 대한 분석이 이루어졌다. 본 연구를 통하여 도출된 새만금 인공호 점착성 퇴적물에 대한 침식특성 산정결과와 함께 미국 Okeechobee호(Hwang and Mehta, 1989), 군산해역(류홍렬 등, 2006) 및 시화호(류홍렬·황규남, 2006) 점착성 퇴적물들에 대한 침식특성 산정결과가 Figs. 9 and 10에 주어진다.

Figs. 9 and 10은 각 지역별 퇴적물별로 저면밀도 변화에 따른 τ_{ce} 와 ϵ_M 의 변화를 각각 보여주는데, 그림으로부터 알 수 있듯이, τ_{ce} 및 ϵ_M 산정곡선은 각각 주어진

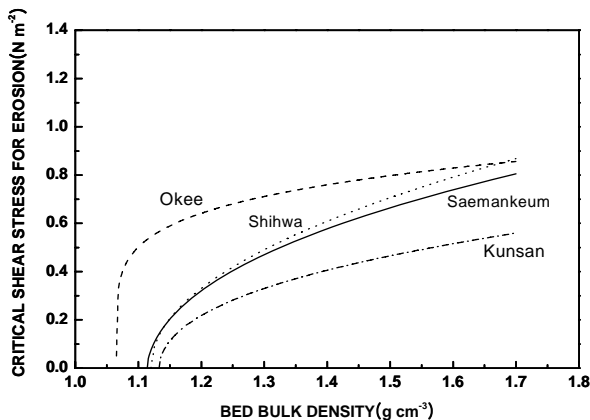


Fig. 9. Comparison of τ_{ce} for Saemankeum Sediments with Other's

저면밀도 값에 대해 정량적으로 상당히 Figs. 9 and 10은 각 지역별 퇴적물별로 저면밀도 변화에 따른 τ_{ce} 와 ϵ_M 의 변화를 각각 보여주는데, 그림으로부터 알 수 있듯이, τ_{ce} 및 ϵ_M 산정곡선은 각 Figs. 9 and 10은 각 지역별 퇴적물별로 저면밀도 변화에 따른 τ_{ce} 와 ϵ_M 의 변화를 각각 보여주는데, 그림으로부터 알 수 있듯이, τ_{ce} 및 ϵ_M 산정곡선은 각각 주어진 저면밀도 값에 대해 정량적으로 상당히 다른 값을 갖는다. 일반적으로 저면의 기준밀도는 1.20 g/cm^3 로 여겨질 수 있는데, 이 밀도 조건에서 새만금 인공호 점착성 퇴적물의 침식한계전단응력은 약 0.3 N/m^2 으로 시화호 퇴적물과 거의 동일한 값을 가지며, 군산해역 퇴적물(약 0.2 N/m^2)보다는 50% 정도 크고, Okeechobee호 퇴적물(약 0.6 N/m^2)보다는 약 3배나 작은 것을 알 수 있다. 침식률계수의 경우에는 정반대의 성향에서 그 형태는 유사하나, 정량적으로는 훨씬 더 큰 차이를 보인다. 저면밀도 1.20 g/cm^3 의 조건에서, 새만금 인공호 점착성 퇴적물의 침식률계수 값은 약 $12 \text{ mg/cm}^2 \cdot \text{hr}$ 으로 시화호 퇴적물과 유사한 값을 가지며, 군산해역 퇴적물(약 $30 \text{ mg/cm}^2 \cdot \text{hr}$)보다는 약 3배 정도 작고, Okeechobee호 퇴적물(약 $0.6 \text{ mg/cm}^2 \cdot \text{hr}$)보다는 약 20배나 큰 것을 알 수 있다.

Mehta(1986), 류홍렬 등(2006) 등에 의해 논의된 바와 같이, 동일 저면조건 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 지

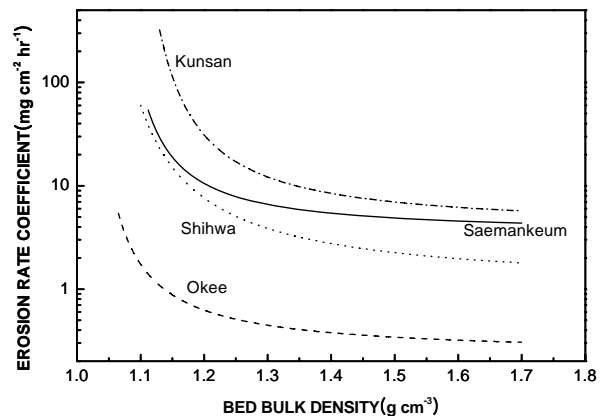


Fig. 10. Comparison of ϵ_M eq. for Saemankeum sediments with other's

Table 9. Comparison of Physico-chemical Properties of Saemankeum Sediments with Other's

| Properties item | Saemankeum | Shihwa | Kunsan | Okeechobee |
|------------------------------|------------|------------|------------|------------|
| average grain size | 41 μ m | 74 μ m | 32 μ m | 15 μ m |
| main mineralogical component | Quartz | Quartz | Quartz | Kaolinite |
| organic contents | 3% | 6% | 3% | 40% |

역에서 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 Figs. 9 and 10에 도식된 각 퇴적물들의 물리·화학적 특성 비교는 Table 9에 요약되어 주어진다.

Table 9에서 알 수 있는 바와 같이 새만금 퇴적물의 평균입경은 41 μ m로 Okeechobee호 퇴적물보다 약 2.5배 정도 크고, 시화호 퇴적물보다는 약 0.5배 작으며, 군산해역 퇴적물보다는 약 0.4배 정도가 크다. 반면에 유기물 함량은 새만금 퇴적물이 Okeechobee호 퇴적물보다 13배 정도 적게 포함하고 있으며, 군산해역 퇴적물과는 유사하고 시화호 퇴적물보다는 약 2배 정도 적긴 하나 거의 동일 수준의 소량에 해당된다. 한편, 광물질 구성성분을 살펴보면, 새만금 퇴적물은 시화호 및 군산해역 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 유기물 함량이 적으며, 비교적 점착력이 작은 석영을 주성분으로 하는 새만금 퇴적물은 Okeechobee호 퇴적물보다 점착력이 더 작을 것으로 판단된다(Table 9 참조). 일반적으로, 저면 퇴적물의 점착력이 더 크다는 것은 저면을 구성하고 있는 개개 토사 입자의 결합력이 더 강하고, 결과적으로 흐름에 대한 저항력 즉, 저면의 전단강도가 더 크다는 것을 의미하므로, 새만금 퇴적물이 상대적으로 큰 점착력을 갖는 Okeechobee호 퇴적물보다 작은 τ_{ce} 값을 갖는 한편, 더 큰 ϵ_M 값을 갖게 되었다고 해석될 수 있다.

한편, 새만금 퇴적물과 군산해역 및 시화호 퇴적물간의 침식특성 차이는 앞서와 동일한 원리로 설명될 수 없는 것으로 보인다. 이 퇴적물들은 광물질 구성성분과

유기물 함량이 모두 거의 유사하고, 단지 군산해역<새만금<시화호 퇴적물 순의 크기로 그 입경만이 차이를 보인다(Table 9 참조). 따라서 앞서와 동일한 원리를 적용한다면, 점착력 및 전단강도는 입경 크기와 반비례하므로, 결국 τ_{ce} 값의 상대적 크기는 시화호<새만금<군산해역 퇴적물 순이 되어야 하며, 그리고 ϵ_M 의 경우에는 군산해역<새만금<시화호 퇴적물 순이 되어야만 하는데, Figs. 9 and 10에 도식된 결과는 이와는 매우 상이한 결과를 보여주고 있다. 본 연구에서는 퇴적물 자체의 물리화학적 기본특성의 조사 항목으로 단지 입경분포, 유기물 함량 및 광물질 구성성분의 3가지 항목만을 고려하였는데, Mehta(1986)는 이 외에도 양이온 전도율, 컨시스턴시 특성, 전단특성 등을 포함하여 8가지 항목을 물리화학적 기본특성 조사항목으로 제시하였으며, 또한 Berlamont *et al.*(1993)은 생물학적 특성까지도 포함하여 총 28개의 항목을 필수 조사항목으로 제시한 바 있다. 따라서, 이러한 점에 비추어, 새만금, 군산해역 및 시화호 퇴적물간의 침식특성 차이는 입경분포, 유기물 함량 및 광물질 구성성분의 3가지 항목 이외의 다른 항목에 의한 영향의 결과인 것으로 추정된다.

결론적으로, Table 9에 제시된 입경분포, 유기물 함량 및 광물질 구성성분의 3가지 항목만으로 새만금, 군산해역 및 시화호 퇴적물간의 침식특성 차이의 원인을 설명하는 것은 불가능한 것으로 여겨지며, 타당성 있는 지역별 침식특성 차이의 원인 해석을 위해서는 퇴적물 자체의 물리·화학적 특성 조사 항목의 수를 추가적으로 확장시킬 필요가 있는 것으로 판단된다. 특히 양이온전도율(CEC: Cation Exchange Capacity)은 입자간의 응집 강도를 나타내는 지표로 많이 사용되므로, 향후에는 이와 같은 항목들에 대한 조사가 필수적으로 포함되어야 할 것이다.

6. 결 론

본 연구에서는 새만금 인공호 점착성 퇴적물의 침식특성을 정량적으로 산정하기 위하여 환형수조를 이용한 실내실험이 수행되었다. 1개 지점에 대해 총 4회의 실험이 수행되었으며 각기 다른 밀도를 갖는 균일저면 조건하에서 수행되었다. 또한 점착성 퇴적물의 침식특성

은 퇴적물 자체의 물리·화학적 기본특성에 크게 영향을 받으므로, 이러한 퇴적물의 기본특성과 연계하여 새만금 인공호 점착성 퇴적물의 침식특성을 정성적으로 해석하였다.

침식실험 수행결과에 따르면 저면밀도 1.17~1.34 g/cm³ 범위에서 침식한계전단응력(τ_{ce})은 0.26~0.52 N/m² 범위에서 로그함수적으로 증가하였고, 침식률계수(ϵ_M)는 밀도가 증가함에 따라 14.28~6.02 mg/cm²·hr 범위에서 지수함수적으로 감소하는 경향을 보였다. 본 연구를 통하여 도출된 침식특성 산정결과는 저면밀도가 증가할 때, 침식한계전단응력은 증가하고 침식률계수는 감소하는 경향을 명확하게 보여주었다.

일반적으로 점착성 퇴적물의 침식특성은 지역적으로 현저한 차이를 보이는 것으로 확인되었으며, 특히 새만금 인공호 점착성 퇴적물의 침식한계전단응력은 군산해역 퇴적물보다는 크며, Okeechobee호 퇴적물보다는 작고, 시화호 퇴적물과는 유사한 것으로 나타났다. 반면에, 새만금 퇴적물의 침식률계수는 군산해역 퇴적물보다는 작으며, Okeechobee호보다는 큰 것으로 나타났다.

본 연구를 통하여 도출된 새만금 인공호 점착성 퇴적물의 침식특성 매개변수의 정량적 결과는 향후 수질 및 표층퇴적물 이송에 대한 수치모형 프로그램 사용시에 요구되는 침식 및 퇴적특성 입력자료로 유용하게 사용될 수 있을 것이며, 저면의 침식과 퇴적에 따른 하상 변동 해석, 수질 및 퇴적물 오염저감을 위한 대책방안 수립 등의 다양한 목적으로 활용될 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 (주)헤인 이엔씨의 지원에 의해 수행되었기에 감사드립니다.

참고 문헌

류홍렬, 황규남 (2006). “시화호 점착성 퇴적물의 침강·침식 특성 매개변수 산정에 대한 실험적 연구.” **한국해안해양공학회지**, 한국해안해양공학회, 제18권, 제3호, pp. 179-188.

류홍렬, 이현승, 황규남 (2006). “금강 하구역 점착성 퇴적물의 침식특성에 관한 실험적 연구.” **한국해안해양공학회지**, 한국해안해양공학회, 제18권, 제4호, pp. 283-293.

국립수산진흥원 (1997). 해양환경공정시험방법.

황규남 (2000). “새만금 갯벌퇴적물의 침강속도 산정을 위한 연구.” **대한토목학회지**, 대한토목학회, 제20권, 제2-B호, pp. 277-286.

황규남, 소상돈, 김태민 (2005). “미세-점착성 퇴적물의

침식률 산정을 위한 실험적 연구.” **한국해안해양공학회지**, 한국해안해양공학회, 제17권, 제2호, pp. 119-128.

Alishahi, M.R. and Krone, R.B. (1964). *Suspension of cohesive sediments by wind-generated waves*. Technical Report HEL-2-9, Hydraulic Engineering Lab. Univ. of California, Berkeley, CA, 24.

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.

Dash, U. (1968). *Erosive behavior of cohesive soils*. Ph.D. Dissertation, Purdue University.

Fukuda, M.K. and Lick, W. (1980). “The entrainment of cohesive sediments in freshwater.” *J. Geophys. Res.* Vol. 85, pp. 2813-2824.

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.

Krishnappan, B.G. (1993). “Rotating circular flume.” *J. Hyd. Engineering*, ASCE Vol. 119, No. 6, pp. 758-767.

Maa, J.P.Y. (1989). *The bed shear stress of an annular sea-bed flume*. Proc. Water Quality Management. Hambur, Germany, pp. 271-276.

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.

Parchure, T.M. (1984). *Erosional behavior of deposited cohesive sediments*. Ph.D. dissertation, Univ. of Florida, Gainesville, pp. 321.

Parchure, T.M. and Mehta, A.J. (1985). “Erosion of soft cohesive sediment deposits.” *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, Oct.

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, pp. 349-358.

(논문번호:07-139/접수:2007.12.03/심사완료:2008.03.17)