

## 고령토 퇴적저면의 침식특성에 대한 실험적 연구

김용묵\* · 김현민\*\* · 황규남\*\*\* · 양수현\*\*\*\*

Kim, Yong-Muk\*, Kim, Hyun-Min\*\*, Hwang, Kyu-Nam\*\*\*, Yang, Su-Hyun\*\*\*\*

### A Laboratory Study on Erosional Properties of the Deposit Bed of Kaolinite Sediments

#### ABSTRACT

In this study, the erosional parameters for deposit beds were quantitatively estimated domestically for the first time through the erosion tests using an annular flume. Four erosion tests were carried out for the deposit beds with different consolidation structures, which were obtained by consolidating the kaolinite slurries for a given time durations. Results of erosion tests showed that the bed shear strength  $\tau_s$  increased with the consolidation time and bed depth. The erosion rate  $\epsilon$  was also shown to be related well with the excess shear stress  $\tau_b - \tau_s$  which was given by the difference between flow shear stress  $\tau_b$  and bed shear strength  $\tau_s$ . While the logarithm of the erosion rate was linearly related with the excess shear stress as  $\tau_b - \tau_s \geq 0.1 \text{ N/m}^2$ , however, the erosion rate decreased rapidly with it when  $\tau_b - \tau_s \leq 0.1 \text{ N/m}^2$ . These erosion test results were also shown to be good enough to verify by comparing with the test results from previous studies and a new equation was suggested to describe the erosion rate more well in the region of  $\tau_b - \tau_s \leq 0.1 \text{ N/m}^2$ .

**Key words :** Kaolinite, Uniform bed, Deposit bed, Shear strength, Erosion rate

#### 초 록

본 연구에서는 환형수조를 이용한 침식실험을 통하여 국내 최초로 퇴적저면의 침식매개변수들이 정량적으로 산정되었다. 퇴적저면은 고농도의 고령토 슬러리를 기 설정된 시간 동안 압밀시켜 조성되었으며, 각기 다른 압밀구조를 갖는 퇴적저면 조건 하에서 총 4회의 침식실험이 수행되었다. 침식실험 결과에 따르면, 흐름전단응력  $\tau_b$ 에 대한 저항력을 나타내는 저면전단강도  $\tau_s$ 는 압밀시간 및 저면(퇴적층) 깊이가 깊어짐에 따라 증가하는 것으로 나타났다. 한편, 침식률  $\epsilon$ 은 흐름전단응력과 저면전단강도의 차로 주어지는 잉여전단응력  $\tau_b - \tau_s$  과 상관성이 매우 큰 것으로 나타났다.  $\tau_b - \tau_s \geq 0.1 \text{ N/m}^2$ 인 경우에 침식률의 로그 값은 잉여전단응력과 선형적 관계에 있으나,  $\tau_b - \tau_s \leq 0.1 \text{ N/m}^2$ 인 조건에서는 잉여전단응력이 작아질수록 침식률이 급격하게 작아지는 경향이 있는 것으로 나타났다. 또한 본 연구에서는 과거 연구결과와의 비교검토를 통하여 본 침식실험 결과에 대한 타당성이 입증되었으며,  $0.1 \text{ N/m}^2$  이하의 잉여전단응력 구간에서 침식률을 보다 잘 표현할 수 있는 새로운 침식률 산정식이 제시되었다.

**검색어 :** 고령토, 균일저면, 퇴적저면, 저면전단강도, 침식률

\* 대산지방해양항만청 항만공사과 과장 (Port of Daesan · km1717@korea.kr)

\*\* (주)유신 항만부 대리 (Yoosin Engineering corporation · khm@yooshin.com)

\*\*\* 정회원 · 전북대학교 토목공학과 교수 (Chonbuk National University · khwang@jbnu.ac.kr)

\*\*\*\* 정회원 · 교신저자 · 전북대학교 토목공학과 박사후연구원 (Corresponding Author · Chonbuk National University · suhyun@jbnu.ac.kr)

Received September 11, 2013/ revised November 1, 2013/ accepted May 1, 2014

## 1. 서론

우리나라 서남해안 해역에는 갯벌이 널리 분포하고 있는데, 이러한 갯벌이 분포하는 지역에는 수층과 저면의 경계면에 부분적으로 압밀된 수 센티미터에서 수 미터의 두께를 가지는 매우 부드러운 점토층이 존재한다(Parchure and Mehta, 1985). 부드러운 점토층은 주기적으로 반복되는 조류 및 파랑 등으로 인하여 충분히 압밀되지 못하고 매우 느슨한 밀도로 압밀되어 형성되는 것으로, 일반적으로 20~320g/L의 부유사농도를 가진다(Nguyen et al., 2012). 이러한 층은 일반 저면에 비하여 상대적으로 밀도 혹은 전단강도(shear strength)가 작기 때문에 비교적 작은 유속 혹은 바닥전단응력(bed shear stress) 하에서 쉽게 침식되어 수층으로 부상되는데, 이러한 특성으로 인하여 수층 탁도의 급격한 증가를 초래할 수 있으며, 결과적으로 태양 빛의 투과능 저하와 이로 인한 수중 생태계의 생산성 저하 및 저층 오염퇴적토의 확산 등으로 인하여 수질오염을 가속화시키는 원인이 될 수 있다. 따라서, 이러한 수질오염 및 오니토 형성 등의 정량적 평가 및 예측을 위해서는 점토층의 침식특성에 대한 해석이 필수적으로 이루어져야 한다.

한편, 부드러운 점토층을 구성하는 갯벌 점착성 퇴적물의 이송특성은 현장특성에 따라 현저한 차이를 보이는 site-specific한 특성을 갖는다(Ryu et al., 2006). 이는 타 지역에서 측정된 결과를 특정지역에 사용할 수 없다는 것을 의미하며, 현장 혹은 실내실험을 통해 측정하는 것이 최선이다. 현장측정은 현장특성이 완벽하게 반영될 수 있다는 장점을 가지나, 현장에서는 흐름 등과 같은 현장조건이 끊임없이 변화하므로 동일조건에서의 재측정이 사실상 불가능하다. 또한 태풍 등과 같은 이상기후 조건에서 장비의 분실 및 측정여건의 어려움 등으로 인하여 실질적인 측정이 어려우므로, 실험의 적용 범위가 제한적이다. 반면, 실내실험에서는 흐름 및 실험조건들을 완벽하게 제어할 수 있으므로 단계적인 실험의 수행이 가능한데, 이 때 제반 조건들을 자연 상태에 가깝게 모의하는 것은 매우 중요한 사항이라 할 수 있겠다.

국내의 경우, 점착성 퇴적물의 제반 이송특성 중 침식특성에 관한 연구는 Hwang et al. (2005), Ryu et al. (2006) and Kim et al. (2011) 등에 의해 다수 수행된 바 있는데, 이들 연구들은 모두 저면 전체 깊이에 대해 일정한 밀도를 갖는 균일저면(uniform bed) 조건에서의 연구들이다. 그러나 실제 해역에서는 저면의 깊이가 깊어짐에 따라 밀도가 증가하는 압밀층의 성상, 즉 퇴적저면(deposit bed)의 형태를 가지므로 이러한 조건에서의 실험이 수행되어야 한다. Hwang et al. (2008) and Kwak et al. (2006)은 압밀층의 성상이 일부 반영된 현장 비교관 시료를 이용하여 McNeil et al. (1996)의 SED flume을 기반으로 하는 특수 제작된 침식물 측정장치로 침식실험을 수행한 바 있는데, 이들 연구는 현장 특성이

반영된 자연상태의 퇴적물 시료를 실험실로 옮겨 실험을 수행한다는 큰 장점을 가지나, 갯 퇴적된 저면, 즉 고농도 슬러리 상태의 퇴적층은 현장에서 실험실로 운반하는 과정에서 시간에 따른 압밀의 발생 등으로 인하여 저면 특성이 변화할 수 있다. 또한, SED flume 형태의 침식물 측정장치에는 지름이 약 10cm 내외에 불과한 core sample이 장착되는데, SED flume을 이용한 침식실험시 퇴적물 표면에서 불균일한 침식의 발생으로 인하여 침식물 산정시 그 정확도가 떨어지므로 SED flume은 갯 퇴적된 퇴적저면을 대상으로 하는 침식실험에는 적합하지 못하다. 갯 퇴적된 퇴적저면에 대한 침식실험 연구는 Dixit (1982), Parchure and Mehta (1985) 등에 의한 해외의 몇몇 연구에서 수행된 바 있는데, 이들은 비록 교란된 시료이긴 하나 실험실에서 갯 퇴적된 퇴적저면을 조성하였으며 환형수조를 이용한 침식실험을 수행하였다. 환형수조는 SED flume에 비해 상대적으로 퇴적층의 표면적이 매우 크고, 부유농도의 변화로부터 침식물이 산정되기 때문에 작은 양의 침식물 산정시 정확도가 높다는 장점을 가진다. 국내에서도 현장특성이 반영된 시료를 이용한 침식특성 산정에 대한 연구가 진행되고 있으나, 갯 퇴적된 퇴적저면에 대한 침식특성 연구는 전무한 실정이다.

본 연구에서는 자연 상태에 가까운 갯 퇴적된 퇴적저면에 대한 침식특성 해석을 위한 기초연구로써, 현장 퇴적물에 대한 침식실험에 앞서 고령토를 이용한 퇴적저면에서의 침식실험이 수행되었다. 침식실험은 국내 최초로 제작되고 타당성이 검증된 전북대 환형수조를 이용하여 수행되며, 이를 통하여 퇴적저면의 침식물이 정량적으로 산정되었다. 침식물 산정시, 과거 연구결과와의 비교검토를 통하여 침식특성 산정결과와 타당성이 검토되었으며, 대표적인 퇴적저면 침식물 산정식인 Parchure and Mehta (1985)의 식을 이용한 점착곡선 뿐만 아니라 낮은 잉여전단응력 구간에서 침식률을 더 잘 표현하는 새로운 침식물 산정식이 도출되었다.

## 2. 이론적 배경

일반적으로 저면은 균일저면(uniform bed)과 퇴적저면(deposit bed)으로 구분되는데, 이들 저면의 가장 중요한 차이점은 침식에 대한 전단강도의 수직분포에 있다(Parchure and Mehta, 1985). Fig. 1에 제시된 균일저면(Type 1)은 수직방향으로 비교적 균일한 저면특성을 가지는데, 시간에 따라 동일한 비율로 침식되어 부유사농도는 선형적으로 증가하는 양상을 보인다. 반면에 퇴적저면(Type 2)은 저면의 깊이가 깊어짐에 따라 저면밀도가 증가하는데, 초반에는 침식이 급격하게 진행되어 부유사 농도가 증가하다가 시간이 지남에 따라 침식이 점차 감소하여 부유사 농도가 일정해지는, 즉 침식률이 '0'에 근접하는 특징을 보인다.

흐름력 혹은 바닥전단응력  $\tau_b$ 가 흐름력에 대한 저면 퇴적물의

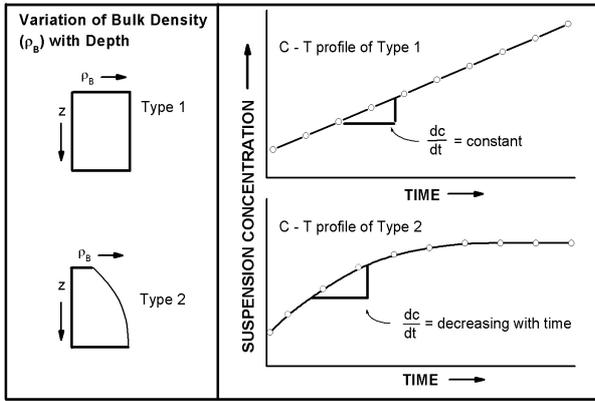


Fig. 1. Difference of Erosional Properties with Shape of Bed (Parchure and Mehta, 1985)

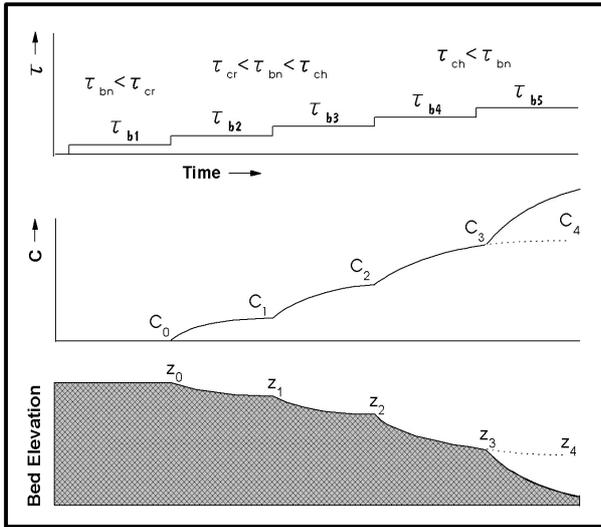


Fig. 2. Relation between Concentration and Bed Density (Parchure, 1984)

저항력, 즉 저면전단강도  $\tau_s$ 보다 크면 침식이 발생하는데, 균일저면에 대한 침식률(erosion rate)  $\epsilon$ 은 보통 다음과 같이 표현된다 (Ariathurai and Arulanandan, 1978).

$$\epsilon = \epsilon_M \left( \frac{\tau_b}{\tau_s} - 1 \right) \quad (1)$$

여기서,  $\epsilon_M$ 는 침식률 계수이고,  $\tau_b$ 는 흐름에 의한 바닥전단응력,  $\tau_s$ 는 퇴적물이 지나는 저면전단강도를 나타낸다. 퇴적물의 저면전단강도  $\tau_s$ 는 종종 침식한계전단응력  $\tau_c$ 로 표현되기도 한다.

한편, 퇴적저면의 침식률은 잉여전단응력  $\tau_b - \tau_s$ 에 의해 결정된다. Fig. 2에 제시된 바와 같이 퇴적저면의 표층에  $\tau_s$ (혹은  $\tau_c$ )보다 더 큰  $\tau_b$ 가 가해지는 경우 침식률은 초기에 가장 크며, 침식이

진행되어 침식깊이가 깊어질수록 잉여전단응력의 크기는 점차 작아지게 된다. 그 결과로써, 침식률은 점차 감소하게 되며 최종적으로는  $\tau_b - \tau_s = 0$ 이 되는 저면 깊이까지만 침식된다. 이후로는 더 이상 침식이 진행되지 않으므로 수층의 부유사 농도는 일정한 값을 가지게 되며, 평형농도  $C_{eq}$ 에 도달하게 된다. 구체적으로, Fig. 2와 같이 퇴적저면에 2단계의 바닥전단응력  $\tau_{b2}$ 를 가했을 경우, 수층의 부유사 농도는  $C_0$ 로부터 초기에는 급격하게 증가하다가 그 증가율이 점차 감소하고, 결국 평형농도  $C_1$ 에 도달하게 된다. 이 때 저면은 수층의 부유사 농도 값에 상응하여  $z_0$ 부터  $z_1$ 까지 침식된 것이며, 평형농도  $C_1$  도달시의 침식깊이  $z_1$ 에서의  $\tau_s$ 는 바닥전단응력  $\tau_{b2}$ 와 동일하다고 할 수 있다. 즉, 임의의  $\tau_b$ 하에서 평형농도  $C_{eq}$ 와 이에 상응하는 침식깊이  $z_{eq}$ 가 주어지면, 그 저면깊이에서의  $\tau_s$ 가 산정될 수 있다.

퇴적저면에 대한 침식률은 주로 Parchure and Mehta (1985)에 의해 제시된 다음의 Eq. (2)와 같이 표현된다.

$$\epsilon = \epsilon_f \exp \left[ a_1 (\tau_b - \tau_s)^{a_2} \right] \quad (2)$$

여기서,  $\epsilon_f$ 는 flocc의 침식률,  $a_1$  및  $a_2$ 는 경험계수이며, Parchure and Mehta (1985)는  $a_2$ 의 값으로 0.5를 사용한 바 있다. Eqs. (1) and (2)로부터, 균일저면의 경우에는 침식률과 소류력이 선형관계가 되나, 퇴적저면인 경우에는 비선형관계로 변화함을 알 수 있다(Parchure and Mehta, 1985).

### 3. 침식실험

#### 3.1 실험장비

퇴적저면에 대한 침식특성 연구를 위해 전복대 환형수조가 사용되었다. 환형수조는 물과 퇴적물을 담을 수 있는 환형모양의 수조와 수조 내에 거치되어 수면과 접촉할 수 있게 수조보다 약간 작은 폭을 갖는 환형의 상부링(top ring)으로 구성되어 있다. 환형수조에서의 흐름은 기본적으로 수면과 접하여 회전하는 상부링의 마찰력에 의해 생성되며, 지속적으로 순환되는 균일한 흐름을 만들 수 있다는 장점을 갖는다. 침식실험에 사용된 환형수조의 제원 및 특성에 대한 자세한 설명은 Hwang et al. (2005)에 주어지며, 환형수조의 사진은 Fig. 3에 주어진다.

한편, 퇴적저면 조건에서는 깊이별로 밀도가 크게 변화하므로, 깊이별 저면밀도를 파악하는 것이 중요하다. 저면의 깊이별 밀도 측정을 위하여 저면밀도 측정 장치를 자체 제작하였으며(Fig. 4 참조), 이에 대한 자세한 설명은 Kim (2008)에 제시된다. 저면밀도의 측정은 조성된 퇴적저면에서 내경 19mm의 금속파이프(®)를 이용하여 퇴적물 코어를 채취함으로써 수행되는데, 채취된 퇴적물

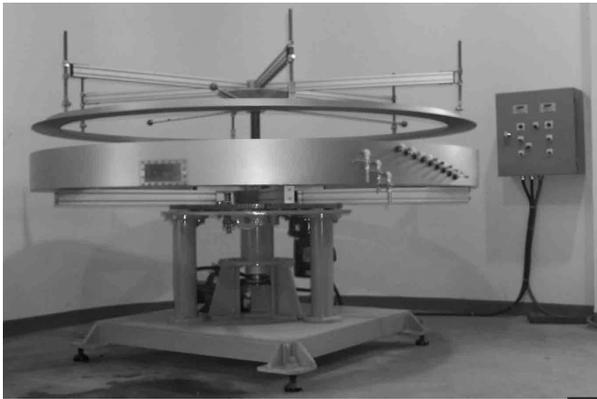


Fig. 3. Annular Flume in Chonbuk National University

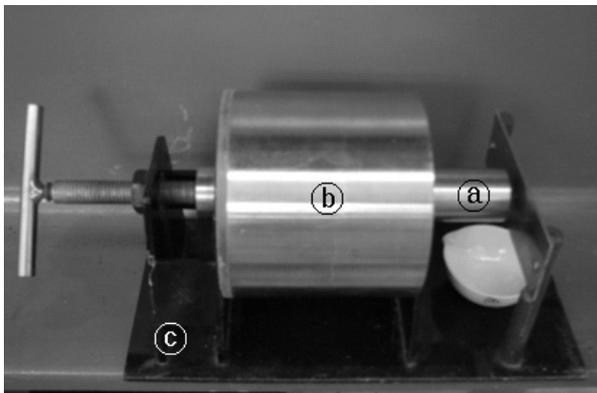


Fig. 4. Apparatus for the Measurement of Bed Density with Depth

코어는 금속파이프와 냉각케이스가 결합된 냉각케이스(b) 일체에 담겨진 드라이아이스와 에탄올에 의해 내부의 금속파이프 내에서 우선 동결된다. 동결된 시료를 담은 냉각케이스 일체를 거치대(c)에 고정시킨 후, 피스톤에 의해 저면 퇴적물 시료가 금속파이프(a)로 밀려나와 4mm씩 등분되었으며, 등분된 퇴적물 시료는 약 110°C의 온도에서 충분히 항량에 도달할 수 있도록 24시간동안 건조되어 깊이별 저면 건조밀도로 환산되었다.

### 3.2 퇴적물 시료 및 퇴적수의 특성

본 연구에서는 퇴적저면의 침식특성을 파악하기 위하여 상용 고령토(Kaolinite)를 이용한 실험이 수행되었다. 고령토는 점착성 퇴적물의 침식 혹은 침강특성을 알아보기 위해 실내실험 시에 가장 널리 사용되는 점토 중의 하나로서, 상용화 되어 있어 구입이 용이하다는 장점을 갖는다. 본 실험에서 사용된 고령토의 성분 특성에 대한 분석은 한국화학시험연구원에 의해 조사되었으며, 그 결과는 Table 1에 주어진다. 또한 고령토 퇴적물의 입경분포는 체 분석과 비중계 분석법을 병행하여 수행되었으며, 입경분포의 분석결과는 또한 Fig. 5에 주어진다.

Table 1. Characteristics of the Kaolinite

Contents	Unit	Values	Method
Whiteness index	-	93.9	KSL 5113-97
SiO <sub>2</sub>	%	71.5	KSE 3805-96
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	18.0	
Ig. loss(organic contents)	%	5.70	KSF 3805-96 (I.C.P)
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	0.20	
CaO	%	2.40	
MgO	%	0.05	
pH (20% aqueous solution)	-	8.50	KSF 2103-93
Apparent specific gravity	-	0.58	KSA 0602-95
Particle size (residual quantity in Sieve No.325)	%	0	KSA 5301-95
Water	%	0.26	

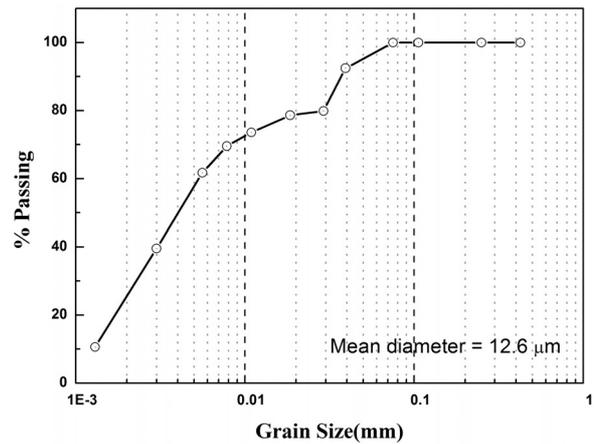


Fig. 5. Grain Size Distribution of Kaolinite Sediment

Table 2. Chemical Characteristics of the Tap Water

Chemical components	Contents (ppm)
Cl <sup>-</sup>	11
NO <sub>3</sub> -N	0.7
SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	3
Zn	0.006
THMs	0.026
Chloroform	0.02

한편, 침식실험 시에 수조 내의 수층 탁수를 구성하기 위한 퇴적수는 연구 목적에 따라서 염수, 증류수, 담수, 수돗물 등의 다양한 유수들이 사용될 수 있다. 본 연구에서는 수돗물(tap water)이 퇴적수로 사용되었으며, 실험에 사용된 수돗물의 화학적 특성이 Table 2에 주어진다.

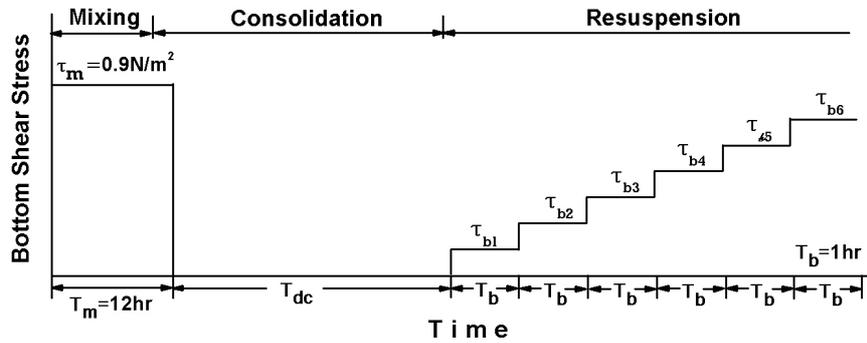


Fig. 6. Schematic Representation of Erosion Tests (Parchure, 1984)

Table 3. Experimental Conditions

Test No.	Consolidation time (day)	Initial concentration (g/L)	Depth of water layer (cm)	Thickness of the bottom (cm)	Averaged dry density (g/L)	Initial shear stress (N/m <sup>2</sup> )	Final shear stress (N/m <sup>2</sup> )	Cumulative time (Min)
1	1	56.8	10	6.2	150.3	0.10	0.25	360
2	2	56.2	10	6.2	157.5	0.10	0.25	360
3	5	56.8	10	6.1	158.0	0.10	0.30	420
4	10	56.1	10	6.1	172.8	0.10	0.43	540

### 3.3 실험방법 및 조건

본 연구에서는 과거 Parchure (1984)에 의해 제시된 방법으로 침식실험이 수행되었다(Fig. 6 참조). 침식실험의 전처리 단계로써, 고령토와 수돗물을 약 2개월간 교반시켜 균일한 농도를 갖는 일정농도의 탁수가 준비되었다. 충분히 혼합되어 균일한 농도를 갖는 탁수는 환형수조로 옮겨져 수조 내의 수심이 15cm를 갖도록 채워졌다. 이후 환형수조의 상부링과 수면을 밀착시키고 상부링을 0.9 N/m<sup>2</sup>의 바닥전단응력으로 12시간동안 다시 교반시킨 다음, 정지 상태에서 기 설정된 압밀시간(consolidation time,  $T_{dc}$ )동안 퇴적물을 침강/퇴적시켜 최종적으로 퇴적저면이 형성되게 하였다. 퇴적저면이 형성된 후, 저면의 깊이에 따라 변화하는 밀도측정 실험이 수행되었고, 이후 주어진 바닥전단응력에 따른 저면의 침식을 변화산정을 위한 침식실험이 수행되었다.

한편, 침식실험은 기 형성된 퇴적저면에  $\tau_{b1}$ (초기 바닥전단응력)을 0.1 N/m<sup>2</sup>로 하고 Eq. (3)으로 정의되는 무차원화 된 잉여전단응력(Normalized excess shear stress,  $(\Delta\tau_{bn})_*$ )을 0.2로 하여 증가되는 바닥전단응력이 단계별로 가해졌다.

$$(\Delta\tau_{bn})_* = \frac{\tau_{bn+1} - \tau_{bn}}{\tau_{bn}} \quad (3)$$

각 단계별 바닥전단응력은 60분 동안 가해졌으며, 수조 내 수층의 탁수는 0, 5, 10, 15, 30, 45, 60분에 채워되었다. 전체 수층에서의 평균 부유사농도를 측정하기 위하여 수층의 각기 다른 2개의 높이에

서 탁수가 동시 채취되었으며, 그 평균값이 실험결과 해석시에 사용되었다. 수층의 부유사 농도는 중량분석법에 의해 산정되었으며, 중량분석을 통한 부유사 농도의 산정방법은 Hwang and Mehta (1989) and Hwnag et al. (2005)에 자세히 주어진다.

본 연구에서는 퇴적저면 형성을 위한 압밀시간을 변화시켜가며 총 4회의 실험이 수행되었으며, 각 실험별 침식실험 조건은 Table 3에 주어진다. 압밀시간은 1~10일까지 변화하였으며, 형성된 저면의 두께는 6.1~6.2cm로 관찰되었다. 형성된 퇴적저면의 평균건조 밀도는 150.3~172.8g/L의 범위를 갖는 것으로 나타났는데, 저면 표층으로부터 약 1.5cm 이내의 상층부는 1.04~1.12g/cm<sup>3</sup>의 느슨한 밀도를 갖는 것으로 나타나 저면의 깊이가 증가할수록 밀도 또한 증가하는 퇴적저면을 대표한다고 할 수 있다.

## 4. 실험결과

### 4.1 저면의 깊이에 따른 건조밀도의 변화

저면 깊이에 따른 밀도의 변화는 압밀에 기인하는데, 압밀시간에 따른 저면의 깊이별 밀도 변화의 대표적인 예로 Test #4의 결과가 Fig. 7에 주어진다. Fig. 7에 제시된 바와 같이, 저면의 밀도는 깊이가 깊어질수록 밀도가 증가하는 퇴적저면의 일반적인 특징을 잘 보여주고 있으며, 이는 모든 실험결과에서 동일하게 나타났다. 저면깊이  $z$ 에 따라 변화하는 저면밀도의 변화에 대한 접합곡선이 산정되었으며, 과거 Hwang and Mehta (1989)에 의해 제시된 Eq. (4)가 사용되었다.

$$\rho_d(z) = b_1 \tanh [b_2(z + b_3)] + b_4 \quad (4)$$

여기서,  $\rho_d$ 는 저면의 건조밀도,  $b_1, b_2, b_3, b_4$ 는 접합곡선 산정에 사용되는 계수이다. 저면의 상층부( $0 < z < 1.8\text{cm}$ )와 하층부( $z > 1.8\text{cm}$ )의 밀도분포에 따라 적용된 각기 다른 계수 값은 Table 4에 주어진다.

### 4.2 시간에 따른 부유사 농도의 변화

시간에 따른 수층 내 부유사 농도의 변화의 대표적인 예로 Test #4의 결과가 Fig. 8에 주어진다. 퇴적저면의 경우에, 침식이 진행되

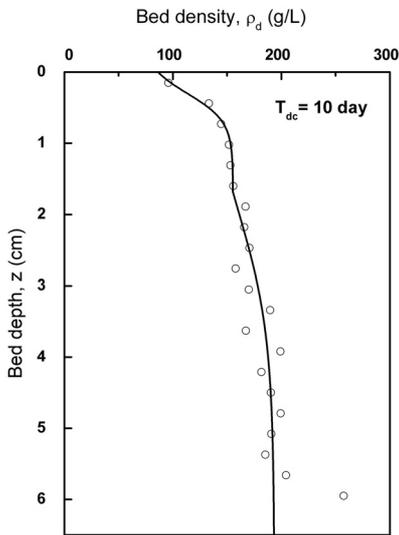


Fig. 7. Variation of Bed Density with Depth (Test #4)

Table 4. Coefficients for Fitting Curve of Bed Density (Test #4)

Bed depth, $z$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$
$0 < z < 1.8\text{cm}$	42.15	2.52	0.30	113.3
$z > 1.8\text{cm}$	32.52	0.58	1.98	160.9

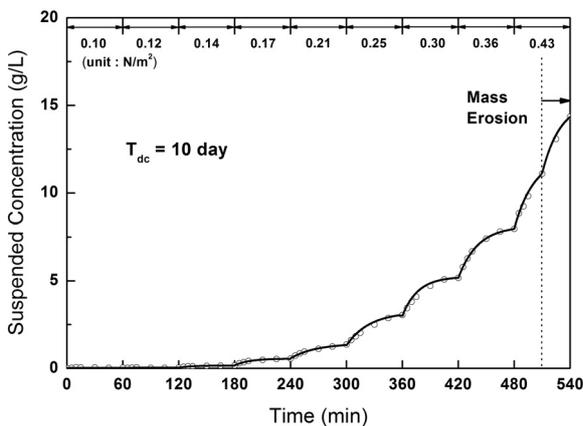


Fig. 8. Time-concentration Variation (Test #4)

는 동안 부유사 농도의 증가율이 지수함수의 형태로 감소하는데, Fig. 8은 이러한 현상을 잘 보여주고 있다. 단계가 진행됨에 따라 점차적으로 증가하는 바닥전단응력에 의해 부유사량은 연속적으로 증가하는 것으로 나타났으며, 9단계에서 발생한 붕괴침식(mass erosion)은 흐름에 의한 바닥전단응력이 저면의 전단강도보다 커짐으로써 발생한 것으로 판단된다.

### 4.3 침식깊이 및 저면전단강도 산정

바닥전단응력에 대응하는 침식깊이까지 침식되는 동안 수층의 부유사 농도는 침식량에 의해 증가되므로, 저면의 침식량( $\Delta z$ )과 수층의 부유사 변동량( $\Delta C$ )은 다음의 관계식으로 표현될 수 있다 (Parchure, 1984).

$$\Delta C \times h = \rho_d(z) \times \Delta z \quad (5)$$

여기서,  $h$ 는 수층의 깊이를 나타낸다. Eq. (5)에서 저면의 침식량은 앞서 제시된 Eq. (4)에 의해  $z$ 의 함수로 표현될 수 있으므로, 침식깊이와 부유사 농도는 다음과 같은 관계를 가진다.

$$C = \frac{1}{h} \int_0^z \rho_d(z) dz = \frac{1}{h} \left( \frac{b_1}{b_2} \ln(\cosh b_2(z + b_3)) + b_4 \right) \quad (6)$$

Eq. (6)으로부터 산정된 단계별 바닥전단응력에 대한 평형농도 및 이에 대응하는 침식깊이 산정결과가 Fig. 9 and Table 5에 주어진다.

한편, 저면전단강도는 부유사 농도가 평형상태에 도달했을 때

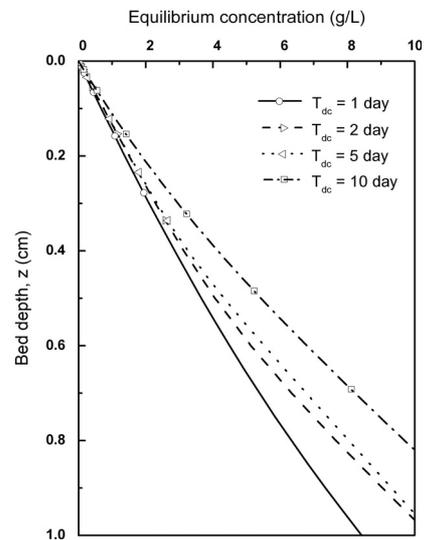


Fig. 9. Variation of Depth-Averaged Concentration with Bed Depth (Test #3)

Table 5. Equilibrium Concentration and Depth of Erosion by the Bottom Shear Stress

Test No.	$\tau_b(N/m^2)$	$C(g/L)$	$z(cm)$
1	0.10	0.085	0.0127
	0.12	0.170	0.0253
	0.14	0.445	0.0658
	0.17	1.081	0.1577
	0.21	1.942	0.2778
2	0.10	0.051	0.0068
	0.12	0.132	0.0177
	0.14	0.405	0.0543
	0.17	1.152	0.1534
	0.21	2.585	0.3356
3	0.10	0.025	0.0033
	0.12	0.098	0.0130
	0.14	0.260	0.0344
	0.17	0.920	0.1215
	0.21	1.800	0.2341
4	0.25	2.650	0.3359
	0.10	0.020	0.0023
	0.12	0.030	0.0035
	0.14	0.152	0.0175
	0.17	0.546	0.0617
4	0.21	1.414	0.1537
	0.25	3.216	0.3223
	0.30	5.228	0.4847
	0.36	8.111	0.6919

Table 6. Coefficient for Fitting of Shear Strength

Test No.	$c_1$	$c_2$	$c_3$
1	-0.153	4.202	0.254
2	-0.139	4.706	0.243
3	-0.185	4.208	0.289
4	-0.300	2.254	0.414

가해지는 바닥전단응력과 동일하다. 따라서 Table 5에 주어지는 바닥전단응력은 대응하는 침식깊이에서의 저면전단강도  $\tau_s$ 와 동일한 값을 가진다. 따라서, 저면의 침식깊이에 따른 저면전단강도  $\tau_s$ 는 다음의 Eq. (7)과 같이 제시될 수 있으며, 그 산정결과는 Fig. 12에 제시된다.

$$\tau_s(z) = c_1 \exp[-c_2 z] + c_3 \quad (7)$$

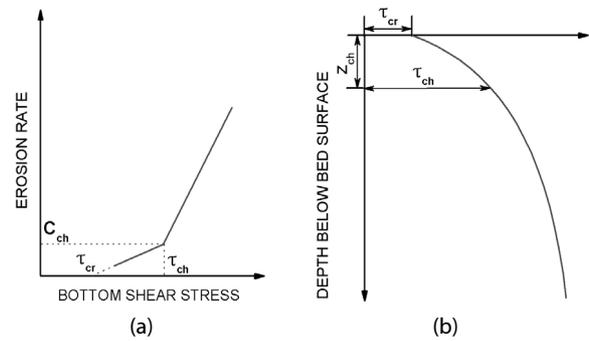


Fig. 10. Representation for Characteristic Elements of Bed Shear Strength (Parchure, 1984)

여기서,  $c_1, c_2, c_3$ 는 접합곡선 산정을 위한 임의의 계수 값이며, 각 실험조건별 계수 값은 Table 6에 제시된다.

#### 4.4 특성전단응력의 산정

앞서 산정된 저면전단강도는 저면에 가해지는 바닥전단응력과 동일하며, 저면의 침식여부는 저항력과 같은 크기의 바닥전단응력을 기준으로 결정되므로, 저면전단강도는 침식한계전단응력과 같은 의미로 해석될 수 있다. 침식한계전단응력은 바닥전단응력의 증가에 따른 침식을 변화에 의해 해석될 수 있는데, Fig. 10(a)에서 저면의 표층에서 침식 발생이 시작하는 시점의 전단응력을 시동침식한계전단응력  $\tau_{cr}$ 이라고 하며, 침식물이 급변하는 시점의 전단응력을 특성전단응력  $\tau_{ch}$ 라고 한다. 특성전단응력  $\tau_{ch}$  값을 가질 때의 부유사 농도를  $C_{ch}$ 라고 할 때 이에 대응하는 침식깊이  $z_{ch}$ 는 Eq. (6)에 의해 산정될 수 있는데, Fig. 10(a)의  $\tau_{ch}$ 는 Fig. 10(b)의 특정 깊이( $z_{ch}$ )에서의 전단강도 값과 동일한 값을 가진다.

압밀시간의 변화에 따른 특성전단강도 산정결과가 Figs. 11 and 12에 제시되는데,  $\tau_{cr}$ 은 압밀시간의 변화에 관계없이 비교적 동일한 값을 갖는 것으로 나타났으며, 그 크기는 약 0.10~0.11  $N/m^2$ 이다. Fig. 12에 제시된 저면깊이별 저면전단강도의 변화 결과에서도 동일한 값을 갖는다.

한편, Fig. 11에서  $\tau_{ch}$ 는 약 0.20~0.21  $N/m^2$ 의 값을 갖는 것으로 나타났는데,  $\tau_{cr}$ 과 동일하게 압밀시간의 변화에 관계없이 비교적 일정한 값을 갖는다. 압밀시간이 증가함에 따라  $C_{ch}$ 는 1.56~1.18  $g/L$ 의 범위로 감소하는데, Eq. (6)에 의해 산정된 침식깊이  $z_{ch}$ 는 0.22~0.13  $cm$ 인 것으로 나타났다. 산정된 침식깊이  $z_{ch}$ 와 Eq. (7)을 이용하여 저면전단강도 값이 산정될 수 있는데,  $\tau_s$ 는 0.19~0.20  $N/m^2$ 의 값을 가지는 것으로 산정되었다. 이는 앞서 도출된  $\tau_{ch}$  값과 비교적 잘 일치하는 결과이며, 이들 결과로부터 고령토 퇴적물 퇴적저면의  $\tau_{cr}$ 은 0.1  $N/m^2$ ,  $\tau_{ch}$ 는 0.2  $N/m^2$ 로 정의될 수 있다.

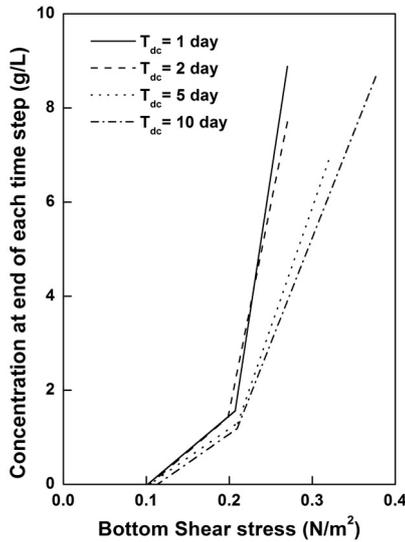


Fig. 11. Concentration at end of Each Time Step as a Function of  $\tau_b$

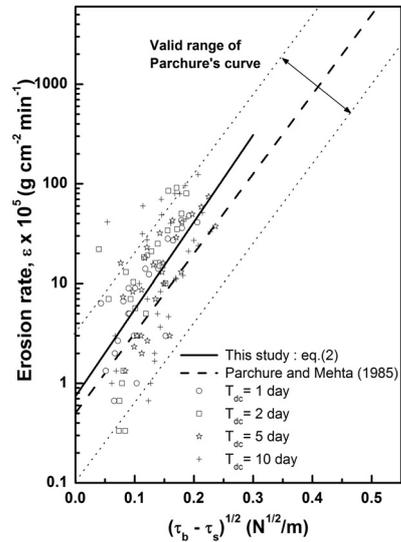


Fig. 13. Estimation of Erosion Rate

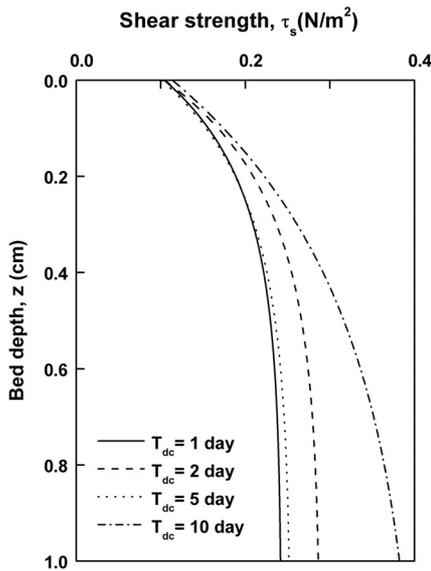


Fig. 12. Depth-variation of Bed Shear Strength

#### 4.5 잉여전단응력에 따른 침식률의 변화

침식률은 단위면적당 침식된 유사질량의 시간변화율을 전체 깊이에서의 부유사 농도의 시간변화율로 변환시킴으로써 얻을 수 있으며, 이는 다음의 Eq. (8)과 같이 표현된다.

$$\epsilon = \frac{\partial m}{\partial t} = h \frac{\partial C}{\partial t} \quad (8)$$

여기서,  $m$ 은 단위 저면 표면적당 침식된 유사의 질량을 나타낸다. 앞서 Fig. 12에 제시된 저면전단강도  $\tau_s$ 의 접합곡선으로부터 임의

Table 7. Comparison of this Study and Parchure(1984) with used Materials

Test items		This study	Parchure (1984)
Particle size ( $\mu\text{m}$ )	Pass rate (%)		
	100	73.0	30.0
	85	33.0	10.0
	50	4.0	1.0
	35	2.7	0.2
Organic contents (%)		5.7	1.2
CEC (meq/100g)		20.0	5.9

의 저면깊이  $z$ 에서의 잉여전단응력  $\tau_b - \tau_s$ 를 산정하고 부유사 농도 단면도를 통해 Eq. (8)을 이용하여 각각의 침식률  $\epsilon$ 이 산정되었으며, 압밀시간  $T_{dc}$ 별 산정된 침식률 결과는 Fig. 13에 주어진다.

한편, 앞서 설명된 바와 같이, 퇴적저면에 대한 침식률  $\epsilon$ 과 잉여전단응력  $\tau_b - \tau_s$ 의 상관관계는 Eq. (2)를 이용하여 표현될 수 있으며, Eq. (2)를 이용하여 도출된 침식률  $\epsilon$ 과 잉여전단응력  $\tau_b - \tau_s$ 간의 관계곡선이 과거 Parchure and Mehta (1985)에 의해 산정된 결과와 함께 Fig. 13에 주어진다. 본 연구결과, 잉여전단응력  $\tau_b - \tau_s$ 가 0.05~0.30  $\text{N/m}^2$ 로 증가할 때 침식률은 0.3~100  $\text{g/cm}^2 \cdot \text{min}$ 로 로그함수적으로 증가하였으며,  $\epsilon_f$ 와  $a_1$ 은 각각  $0.74 \times 10^{-5} \text{g/cm}^2 \cdot \text{min}$ , 20.12  $\text{N/m}^2$ 로 산정되었다. 함께 도식된 Parchure and Mehta (1985)의 결과와는 정량적으로 차이를 보이는데, 잉여전단응력이 약 0.20  $\text{N/m}^2$ 일 때 본 연구결과의 침식률이 Parchure and Mehta (1985)의 결과보다 약 2배 큰 것으로 나타났다.

한편, Parchure and Mehta (1985)에서는  $\epsilon_f$ 와  $a_1$ 이 각각  $0.5 \times 10^{-5} \text{g/cm}^2 \cdot \text{min}$ , 18.4  $\text{N/m}^2$ 로 제시된 바 있는데, 이는 본 연구결과에 비해 다소 작은 값이다. 이는 본 연구의 수행결과가 잉여전단

응력에 의한 퇴적저면의 침식률이 더 크다는 것을 의미하는데, 이러한 결과는 사용된 고령토의 기본특성 차이에 의한 것으로 판단된다. Table 7에는 본 연구에서 사용된 고령토 및 Parchure and Mehta (1985)의 실험에서 사용된 고령토의 물리화학적 특성 비교가 주어지는데, 본 연구의 유기물 함량은 Parchure and Mehta (1985)의 유기물 함량보다 약 4.7배 크고, CEC (Cation Exchange Capacity) 값은 약 3.4배 큰 것으로 나타났다. 또한 퇴적물의 입경은 Parchure and Mehta (1985)의 퇴적물 시료에 비하여 비교적 조립한 분포를 가지는 것으로 나타났다.

일반적으로 점착성 퇴적물은 입경이 작을수록, 유기물 함량이 클수록, CEC값이 클수록 점착력이 증가하는 경향이 있다(Mehta, 2013; Lick and Mcneil, 2001). 유기물 함량의 차이는 동일 수준의 소량에 해당하며, 점착성과의 관계가 종종 유효하지 않은 CEC의 영향을 무시할 경우에, Parchure and Mehta (1985)보다 퇴적물의 입경이 더 조립한 것으로 나타난 본 연구의 고령토 시료는 더 작은 점착력을 가질 것으로 판단된다. 퇴적물의 점착력이 크다는 것은 개개의 토사입자의 결합력이 더 강하고, 결과적으로 침식률이 더 크다는 것을 의미하므로, 상대적으로 작은 점착력을 갖는 고령토의 침식률이 Parchure and Mehta (1985)의 침식률보다 더 큰 값을 갖게 되었다고 해석할 수 있다. 이러한 분석 결과에 비추어 볼 때, 본 연구에서 산정된 고령토 퇴적저면의 침식특성은 타당하다고 할 수 있다.

#### 4.6 Parchure and Mehta (1985) 산정식의 검토

앞서 Fig. 13에 제시된 Parchure and Mehta (1985)의 식을 이용하여 산정된 접합곡선은 잉여전단응력  $\tau_b - \tau_s$ 가 약 0.1 N/m<sup>2</sup>보다 작은 구간에서 데이터의 분산도가 다소 크게 나타난다. 잉여전단응력이 작아질수록 침식률은 급격하게 작아지는 경향을 보이는데, 앞서 제시된 Eq. (2)는 이러한 경향을 잘 반영하지 못하는 것으로 보인다. 이에 본 연구에서는 Eq. (2)를 확장하여 2차 항이 추가된 형태의 공식(Eq. (9) 참조)이 제시되며, Eq. (9)를 적용하면 낮은 잉여전단응력 구간에서 침식률이 급격히 작아지는 경향이 더 잘 표현될 수 있다.

$$\epsilon = \epsilon_f \exp[a_1(\tau_b - \tau_s)^{a_2}] \exp[a_3(\tau_b - \tau_s)^{2a_2}] \quad (9)$$

여기서,  $\epsilon_f$  및  $a_1$ ,  $a_3$ 은 각각  $0.011 \times 10^5$  g/cm<sup>2</sup>·min, -99.4, 61.131로 산정되었으며,  $a_2$ 는 앞서와 동일하게 Parchure (1984)에 의해 사용되었던 0.5를 적용하였다. Eq. (9)을 이용한 접합곡선 산정 결과는 앞서 Eq. (2)를 이용한 결과와 함께 Fig. 14에 제시된다.

Fig. 14에서, 잉여전단응력  $\tau_b - \tau_s$ 가 약 0.1 N/m<sup>2</sup>보다 작은 구간에서 Eqs. (2) and (9)를 이용한 접합곡선의 차이가 크게

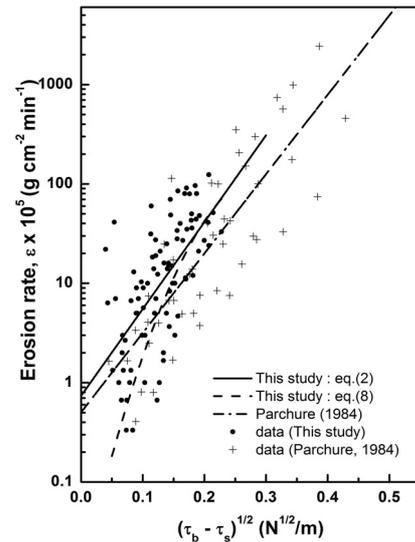


Fig. 14. Comparison between Former and New Equation

나타나고 있는데, 이러한 차이는 침식률이 작아질수록 더 크게 나타난다. 침식실험 수행시 적용되는 바닥전단응력  $\tau_b$ 의 초기값이 0.1 N/m<sup>2</sup>로 이보다 작은 바닥전단응력에서의 측정이 어려울 뿐만 아니라 수층의 부유사농도 및 저면밀도  $\rho_d$  측정시에 작은 침식률을 측정할 수 있을 만큼의 정밀도가 확보되지 않기 때문에 이러한 차이를 보이는 것으로 판단된다. 실질적으로, 환형수조를 이용하여 이 구간에서의 침식률을 정밀하게 측정하는 것은 어려운 것으로 판단되며, 따라서 잉여전단응력  $\tau_b - \tau_s$ 가 약 0.1 N/m<sup>2</sup>보다 작은 구간에서의 값은 의미없다고 할 수 있겠다. 침식률을 보다 정밀하게 측정하기 위해서는 저면밀도 측정시에 정확성을 향상시킬 수 있는 레이저 및 초음파를 이용한 장비의 사용이 적용될 필요가 있으며, 수층의 부유사 농도 측정시에는 재래식 방법인 중량분석법과 함께 보다 높은 정밀도와 시간단축을 장점을 가지는 OTS (Optical Transmission Sensor), 또는 OBS (Optical Backscatter Sensor)의 활용을 도입하여 정밀도를 향상시킬 필요가 있을 것으로 판단된다.

#### 5. 결론

본 연구에서는 퇴적저면으로 이루어진 고령토의 침식특성을 정량적으로 산정하기 위하여 환형수조를 이용한 침식실험이 수행되었다. 총 4회의 침식실험이 각기 다른 압밀시간을 갖는 퇴적저면 조건 하에서 수행되었으며, 퇴적저면의 침식률이 정량적으로 산정되었다. 또한, 과거 연구결과와의 비교검토를 통하여 실험결과 타당성이 간접적으로 검증되었다.

본 연구결과에 따르면, 고령토와 수돗물을 이용하여 조성된 갯 퇴적된 층은 압밀에 의해 깊이가 깊어짐에 따라 저면밀도가

증가하는 것으로 나타났으며, 또한 압밀시간이 길어질수록 저면밀도가 증가하였다. 수층부유사 농도변화와 저면의 깊이별 밀도와의 관계를 이용하여 산정된 저면전단강도는 압밀시간 및 저면 깊이에 따라 증가하는 것으로 나타났다. 잉여전단응력변화에 따른 침식률은 로그함수 형태로 증가하였는데, 본 연구에서 산정된 결과는 과거 연구결과와의 비교-검토를 통하여 타당성이 검증되었으며, 과거 연구결과와의 침식률 매개변수의 차이는 퇴적물의 물리화학적 특성에 기인한 것으로 판단된다. 한편, 본 연구에서 산정된 결과에서는 잉여전단응력이 0.1 N/m<sup>2</sup> 이상인 경우에는 침식률의 log 값과 잉여전단응력은 선형적 관계에 있으나, 0.1 N/m<sup>2</sup> 이하에서는 잉여전단응력이 작아질수록 침식률이 급격하게 작아지는 경향을 보이는 것으로 나타났으며, 이러한 경향을 잘 반영하는 새로운 식이 제시되었다.

본 연구에서 수행된 퇴적저면의 침식특성 연구는 자연 상태 퇴적물의 침식특성 산정을 위한 선행연구로서 큰 가치를 지닌다고 할 수 있다. 비록 본 연구가 상용 고령토를 이용한 실험이라 하더라도, 퇴적저면에서의 거동특성에 대한 국내 연구가 전무하기 때문에 국내 최초로 수행된 퇴적저면의 침식실험으로서 큰 의미를 가지며, 본 연구를 통하여 도출된 고령토 퇴적저면의 침식특성 산정결과는 향후 퇴적물의 이송특성 해석시 중요한 기초자료로 활용될 수 있을 뿐만 아니라 퇴적물의 침식적 평가를 위한 수치모형 실험시 필수 입력자료로 요구되는 침식조건(침식항계전단응력 및 침식률 계수)으로 사용되는 등 다양한 목적으로 크게 활용될 수 있을 것이다.

## 감사의 글

이 논문은 2014년 해양수산부 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(연안침식 대응기술 개발).

## References

Ariathurai, R. and Arulanandan, K. (1978). "Erosion rates of cohesive soils." *J. of Hydr. Div.*, ASCE, Vol. 104, No. HY2, pp. 279-283.  
 Dixit, J. G. (1982). *Resuspension potential of deposited kaolinite beds*, Master's Thesis, University of Florida, Gainesville, Florida.  
 Hwang, K. N., Ryu, H. R., Lee, S. O. and Cho, Y. S. (2006). "Automated sediment erosion rate apparatus for measurement of erosion rate of undisturbed sediments." *ICSE-4(The 4th International*

*Conference on Scour and Erosion, 2008)*, ISSMGE & Japanese Geotechnical Society, Chuo Univ., Tokyo, Japan, pp. 115 (CD pp. 201-207).  
 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.  
 Hwang, K. N., So, S. D. and Kim, T. M. (2005). "An experimental study for estimation of erosion rate of fine cohesive sediments." *J. of Ocean Engineering and Technology*, KSCOE, Vol. 17, No. 2, pp. 119-128 (in Korean).  
 Kim, H. M. (2008). *A study on erosional properties of deposit bed with Kaolinite sediments*, Master's Thesis, Chonbuk National University (in Korean).  
 Kim, M. K., Yang, S. H., Tae, D. H. and Hwang, K. N. (2011). "A laboratory study for erosional properties of cohesive sediments from Mokpo coast." *J. of the Korea Society of Ocean Engineers*, KSOE, Vol. 25, No. 1, pp. 14-21 (in Korean).  
 Kuijper, C., Corelisse, J. M. and Winterwerp, J. C. (1989). "Research on erosive properties of cohesive sediments." *J. of Geophysical Research*, Vol. 94, No. C10, pp. 14341-14350.  
 Kwak, K. S., Lee, J. H., Park, J. H. and Woo, H. S. (2006). "Evaluation of local erosion characteristics of fine-grained soils in the west coast area." *J. of Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 26, No. 5C, pp. 323-331 (in Korean).  
 Lick, W. and McNeil, J. (2001). "Effects of sediment bulk properties on erosion rates." *J. of science of the total environment*, Vol. 266, pp. 41-48.  
 McNeil, J., Taylor, C. and Lick, W. (1996). "Measurements of erosion of undisturbed bottom sediments with depth." *J. of Hydraulic Eng.*, Vol. 122, pp. 316-324.  
 Mehta, A. J. (2013). "An introduction to hydraulics of fine sediment transport." World scientific.  
 Nguyen, D. P., Jung, E. T., Park, K. C. and Hwang, K. N. (2012). "A laboratory study on rheological properties of fluid mud." *J. of Ocean Engineering and Technology*, KSCOE, Vol. 24, No. 3, pp. 203-209 (in Korean).  
 Parchure, T. M. (1984). *Erosional behavior of deposited cohesive sediments*, Ph.D. Dissertation, University of Florida, Gainesville, Florida.  
 Parchure, T. M. and Mehta, A. J. (1985). "Erosion of soft cohesive sediment deposits." *J. of the Hydraulics Division*, ASCE, Oct.  
 Ryu, H. R., Lee, H. S. and Hwang, K. N. (2006). "The quantitative estimation of erosion rate parameters for cohesive sediments from Keum estuary." *J. of Ocean Engineering and Technology*, KSCOE, Vol. 18, No. 4, pp. 283-293 (in Korean).