

새만금 점착성 퇴적물의 퇴적저면 침식특성에 관한 실험적 연구 A Laboratory Study on Erosional Properties of the Deposit Bed of Saemankeum Sediments

양수현* · 이승중** · 황규남***

Su-Hyun Yang*, Seung-Jong Lee** and Kyu-Nam Hwang***

요 지 : 본 연구에서는 환형수조를 이용한 침식실험을 통하여 국내 최초로 자연시료를 이용한 퇴적저면 침식특성이 정량적으로 산정되었다. 새만금 점착성 퇴적물을 이용한 실험이 수행되었으며, 퇴적저면 형성을 위한 압밀시간을 변화 시켜가며 총 4회의 침식실험이 수행되었다. 침식실험 결과에 따르면, 저면전단강도 τ_s 는 압밀시간 및 저면의 깊이가 증가함에 따라 증가하는 것으로 나타났다. 잉여전단응력 $\tau_b - \tau_s$ 에 따른 침식률은 로그함수 형태로 증가하는 것으로 나타났다. 0.2 N/m^2 이하의 잉여전단응력 구간에서는 잉여전단응력이 작아질수록 침식률이 급격하게 작아지는 경향을 보였다. 본 연구결과는 타 지역의 연구결과와 비교분석되었으며, 그 정량적 값은 지역적으로 큰 차이를 보이는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 균일저면, 퇴적저면, 저면전단강도, 침식률

Abstract : In this study, the erosional properties of deposit bed for the natural sediments are quantitatively estimated domestically for the first time using annular flume. Four erosion tests for Saemankeum sediments have been carried out on different consolidation time. Experimental results of erosional tests show that shear strength τ_s increases with the increases of consolidation time and bed depth. The erosion rate increases logarithmically with the increases of exceed shear strength $\tau_b - \tau_s$. But, the erosion rate decreases rapidly with the decreases of exceed shear strength under the 0.2 N/m^2 . Experimental results of this study are found to be remarkably different in quantity as compared with those for results of previous study.

Keywords : uniform bed, deposit bed, shear strength, erosion rate

1. 서 론

새만금 등과 같이 갯벌과 인근 바다를 매립하여 이루어진 간척지의 조성은 주변 생태계 파괴, 수질 오염 등의 환경적 측면에서 큰 문제를 야기할 수 있다. 특히 간척지에 널리 분포하는 점착성 퇴적물은 반복적인 조류 및 파랑 등으로 인하여 충분히 압밀되지 못하고 느슨한 밀도로 저면에 존재하게 되는데, 이러한 점토층은 일반적인 저면에 비하여 상대적으로 밀도 혹은 전단강도(Shear strength)가 작기 때문에 비교적 작은 유속 혹은 바닥전단응력(Bed shear stress) 하에서 쉽게 침식되어 수층으로 부상된다. 이러한 특성으로 인하여 수층 탁도의 급격한 증가를 초래할 수 있으며, 결과적으로 태양 빛의 투과능 저하와 이로 인한 수중 생태계의 생산성 저하 및 저층 오염퇴적도의 확산 등으로 인하여 수질오염을 가속화시키는 원인이 될 수 있다. 이러한 문제의 해결을 위해서는 점착성 퇴적물의 이송특성에 대한 해석이 필수적으로 이루어져야 한다(Kim et al., 2014).

점착성 퇴적물의 이송특성은 현장특성에 따라 현저한 차이를 보이는 Site-specific한 특성을 가지므로(Ryu et al., 2006), 현장 혹은 실내실험을 통해 측정하는 것이 최선이다. 현장측정은 현장특성을 완벽하게 반영하여 실험할 수 있다는 장점을 가지나, 기후조건 및 현장조건 제약의 어려움 등으로 인하여 실질적인 측정이 어려우므로 실험의 적용범위가 제한적이다. 반면, 실내실험에서는 흐름 및 실험조건을 제어하기 용이하고 단계적인 실험수행이 가능하기 때문에 현장측정에 비해 상대적으로 실험의 편의성을 도모할 수 있으며, 이 때 제반 조건들을 자연 상태에 가깝게 모의하는 것은 매우 중요한 사항이라 할 수 있겠다.

국내의 경우, 점착성 퇴적물의 이송특성 중 침식특성에 관한 연구는 Hwang and So (2002), Ryu et al. (2006), Hwang et al. (2008)에 의해 다수 수행된 바 있다. 이들 연구는 자연시료를 이용한 점착성 퇴적물의 침식특성을 정량적으로 산정한 실내실험 연구이나, 저면 전체 깊이에 대해 일정한 밀도를 갖는 균일저면 조건에서의 연구들이다. 점착

*전북대학교 토목공학과(Civil Eng., Chonbuk National Univ., Baekjedae-ro 567, Duckjin-gu, Jeonju, 561-756, Korea)

** (주)서영엔지니어링 향만팀(Seoyeong Eng. Inc., Hwangsaoul-ro, Bundang-gu, Seongnam, 463-825, Korea)

***전북대학교 토목공학과(Corresponding author: Civil Eng., Chonbuk National Univ., Baekjedae-ro 567, Duckjin-gu, Jeonju, 561-756, Korea, Tel: +82-63-270-2345, Fax: +82-63-270-2421, khwang@jbnu.ac.kr)

성 퇴적물의 침식특성 해석시 저면은 연직방향 밀도변화에 따라 균일저면(Uniform bed)과 퇴적저면(Deposit bed)으로 구분되는데, 실제 해석에서는 저면 깊이별 다양한 밀도변화를 보이는 압밀층의 성상, 즉 퇴적저면의 특성을 가지고 있기 때문에 실험 수행시 이러한 특성이 반영된 저면이 조성되어야만 한다. 국내에서 퇴적저면 조건에서의 실험은 Kim et al. (2014)에 의해 수행된 연구가 유일한데, Kim et al. (2014)은 환형수조를 이용하여 퇴적저면 조건에서의 고령토 점착성 퇴적물에 대한 침식실험을 수행하고 과거 타 연구결과와의 비교분석을 통하여 침식실험 결과의 타당성을 검증한 바 있다. 또한, 기존에 Parchure (1984)에 의해 제시된 침식률 산정공식을 확장하여 낮은 잉여전단응력 구간에서 침식률을 더 잘 표현하는 새로운 침식률 산정식을 제시하였다. 그러나 Kim et al. (2014)의 연구는 단지 상업용 고령토 시료를 이용하여 수행된 것으로서, 현재까지 자연 상태의 점착성 퇴적물을 이용한 퇴적저면 조건에서의 침식실험은 수행된 바 없다.

이에 본 연구에서는 자연시료를 이용한 퇴적저면 침식실험의 국내 최초 연구로서 새만금 점착성 퇴적물을 이용한 퇴적저면에서의 침식실험이 수행된다. 침식실험은 국내 최초로 제작되고 타당성이 검증된 전북대 환형수조를 이용하여 수행되며, 이를 통하여 침식률이 정량적으로 산정된다. 또한 본 연구를 통하여 도출된 침식률 산정결과는 퇴적물 자체의 물리·화학적 특성과 연계하여 과거 타 퇴적물의 침식특성 산정결과와 비교·검토된다.

2. 현장 퇴적물 표본시료 채취

새만금 점착성 퇴적물의 퇴적저면 침식특성 조사를 위한 표본시료는 2007년 2월 13일에 1개 정점에서 채취되었는데, 본 연구에서 사용된 표본시료는 과거 Hwang et al. (2008)에 의해 사용된 시료와 동일 시료이다. 퇴적물 표본시료는 채취기(Grab sampler)를 이용하여 채취되었으며, 현장의 해수조건을 반영시키기 위하여 동일정점에서 해수가 채수되어 침식실험의 전 과정에서 사용되었다. 퇴적물 표본시료 채취위치의 경위도 좌표와 채취 당시의 수심, 수온 및 염도는 Table 1에 제시된다.

3. 물리·화학적 특성

점착성 퇴적물의 침식특성은 입자간의 응집 현상에 의해 크게 영향을 받으며, 응집강도는 광물질 구성, 입경분포, 유기물 함량 등으로 표현되는 퇴적물 자체의 물리·화학적 기본

Table 1. Basic information of sampling site (Hwang et al., 2008)

Sampling date	Coordinate	Depth (m)	Temperature (°C)	Salinity (‰)
2007.02.13	35°43' 5.5" N 126°33' 35.1" E	8 m	7.6	26.1

특성에 따라 크게 변화하므로(Mehta, 1986), 본 연구에서는 새만금 점착성 퇴적물 표본시료의 물리·화학적 특성 조사가 수행되었다. 한편, 본 연구에서 사용된 새만금 퇴적물 표본시료는 Hwang et al. (2008)에 의해 사용된 시료와 동일 시료로써, Hwang et al. (2008)은 새만금 점착성 퇴적물 시료의 물리·화학적 특성에 대해 자세히 제시한 바 있으므로 본 연구에서는 각 항목별로 Hwang et al. (2008)에 의해 분석된 결과들이 단지 요약되어 제시된다.

3.1 입경분포

새만금 점착성 퇴적물 시료에 대한 입경분포는 체분석과 비중계 분석법을 병행하여 분석되었으며, 입경분포 실험 수행결과는 Fig. 1에 주어진다. Fig. 1에 제시된 입경분포의 변화를 살펴보면, 새만금 점착성 퇴적물은 과거 2001년에 수행된 새만금 점착성 퇴적물(Lee, 2001)보다는 더 세립하고, 고령토 퇴적물(Kim et al., 2014) 및 Francis lake 퇴적물(Parchure, 1984)보다는 조립한 분포를 보이는 것으로 나타났다.

3.2 유기물 함량

새만금 퇴적물의 유기물 함량은 해양환경공정시험방법(NFRDI, 1997)에 따라 강열감량법으로 분석되었다. 새만금 퇴적물의 유기물 함량은 약 3.0%로, 과거 2001년 새만금 퇴적물(Lee, 2001)의 유기물 함량보다는 1.5배 크고 고령토 퇴적물(Kim et al., 2014)보다 약 1.9배 정도 적은 것으로 나타났다. 또한 Francis lake 퇴적물(Parchure, 1984)보다는 약 2.5배 큰 것으로 나타났으나 이들 유기물 함량은 10% 이하의 거의 동일한 수준의 소량에 해당된다.

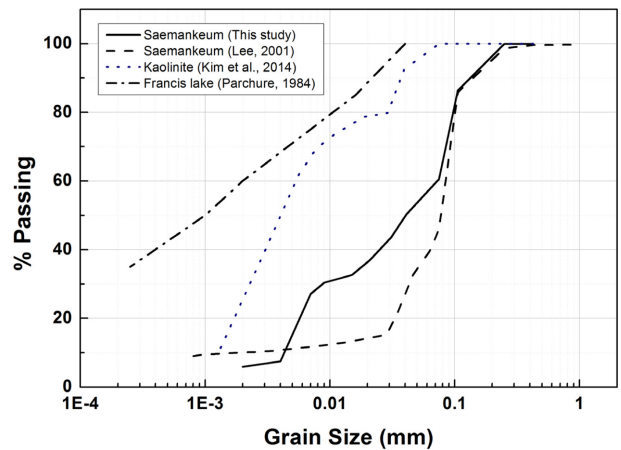


Fig. 1. Comparison of grain size distribution.

Table 2. Comparison of organism content

Site	% of organic contents
Saemankeum (This study)	3.0
Saemankeum (Lee, 2001)	2.0
Kaolinite (Kim et al., 2014)	5.7
Francis lake (Parchure, 1984)	1.2

3.3 광물질 구성성분

새만금 퇴적물의 광물질 구성성분은 전북대학교 공동시험소가 보유하고 있는 회절분석기(X-ray diffraction)를 이용한 정성적 분석이 수행되었다. 분석에 따르면, 새만금 점착성 퇴적물의 광물질 구성성분은 내림차순으로 석영, 장석, 미사장석, 일라이트, 고령토, 녹니석 등이 지배적인 성분인 것으로 나타났으며, 이는 과거 2001년의 새만금 점착성 퇴적물의 분석결과와 동일한 결과이다. 한편, Francis lake 퇴적물(Parchure, 1984)은 내림차순과 관계없이 스멕타이트, 일라이트, 고령토, 석영으로 구성되어 있는 것으로 나타났다.

4. 침식실험 방법 및 조건

본 연구에서는 Parchure (1984) 및 Kim et al. (2014)에 의해 제시된 방법으로 침식실험이 수행되었다. 침식실험을 위한 실험장치로는 전북대 환형수조가 사용되었으며, 환형수조의 제원 및 특성에 대한 자세한 사항은 Hwang et al. (2005)에 주어진다. 새만금에서 채취된 퇴적물 표본시료를 No. 200체로 습식 체질하여 분리된 미세 토사입자만이 침식실험에 사용되었으며, 퇴적물 시료와 해수를 교반시켜 균일농도를 갖는 일정농도의 탁수가 준비되었다. 충분히 혼합되어 균일농도를 갖는 탁수는 환형수조로 옮겨져 수조내의 수심이 15 cm가 되도록 채워졌으며, 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 변화 산정을 위한 침식실험이 수행되었다. 퇴적저면의 깊이별 밀도측정은 특수 제작된 저면밀도 측정장치를 이용하여 측정되었으며, 저면밀도 측정장치 및 측정방법에

대한 자세한 사항은 Kim et al. (2014)에 제시된다.

한편, 각 단계별로 적용된 바닥전단응력은 초기 전단응력을 0.14 N/m^2 로 하고 식 (1)로 정의되는 무차원화 된 잉여전단응력(Normalized excess shear stress, $(\Delta\tau_{bn})_*$)을 0.2로 하여 증가되는 바닥전단응력이 단계별로 가해졌다.

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

각 단계별 전단응력은 60분씩 가해졌으며, 수조 내 수층의 탁수가 0, 5, 10, 15, 30, 45, 60분에 채취되었다. 전체 수층에서의 평균 부유사농도를 측정하기 위하여 수층의 각기 다른 2개의 높이에서 탁수가 동시 채취되었으며, 그 평균값이 실험결과 해석시에 사용되었다. 수층의 부유사 농도는 중량 분석법에 의해 산정되었으며, 중량분석을 통한 부유사 농도의 산정방법은 Hwang and Mehta (1989) 및 Hwang et al. (2005)에 자세히 주어진다.

본 연구에서는 새만금 퇴적물의 퇴적저면 형성을 위한 압밀시간을 변화시켜가며 총 4회의 실험이 수행되었으며, 각 실험별 침식실험 조건은 Table 4에 주어진다. 압밀시간은 1~10일까지 변화하였으며, 최종적으로 형성된 저면의 두께는 3.7~5.2 cm로 관찰되었다.

5. 침식실험결과

5.1 저면의 깊이에 따른 건조밀도의 변화

저면의 깊이에 따른 밀도변화는 압밀에 기인하는데, 이러한 압밀은 1차 압밀과 2차 압밀로 구분된다. 1차 압밀은 퇴적물 입자사이로 간극수가 배출되면서 발생하며 뚜렷한 저면 두께의 감소와 전단강도의 증가를 발생시킨다. 2차 압밀은 1차 압밀이 종료된 이후 입자의 재배열에 의해 진행되는데, 2차 압밀이 진행되는 동안 저면의 두께변화는 미미하나 저면의 전단강도는 연속적으로 증가하는 양상을 보인다. 저면의 압밀이 진행되면 저면의 상부보다 하부의 밀도값이 훨씬 더 크게 나타난다.

저면의 깊이에 따라 변화하는 저면밀도 값은 저면깊이 z 에 따른 함수로 표현될 수 있는데, 과거 Hwang and Mehta (1989)는 다음과 같은 식을 제시한 바 있다.

$$\rho_d(z) = a_1 \tanh[a_2(z + a_3)] + a_4 \quad (2)$$

Table 3. Comparison of mineralogical compositions

rank	Saemankeum (This study)	rank	Saemankeum (Lee, 2001)	rank	Francis lake (Parchure, 1984)
1	석영(Quartz)	1	Quartz	1	Smectite Illite Kaolinite Quartz
2	장석(Feldspar) 미사장석(Albite)	2	Feldspar Albite		
3	일라이트(Illite)	3	Illite		
4	고령토(Kaolinite) 녹니석(Chlorite)	4	Kaolinite Chlorite		

Table 4. Experimental conditions

Test No.	압밀 시간 (day)	초기 탁수농도 (g/L)	수층 깊이 (cm)	저면 두께 (cm)	초기 전단응력 (N/m ²)	최종 전단응력 (N/m ²)	실험 시간 (Min)
1	1	135.1	10	5.2	0.14	0.36	360
2	2	137.5	10	4.4	0.14	0.75	600
3	5	137.8	10	4.1	0.14	0.75	600
4	10	139.2	10	3.7	0.14	0.75	600

여기서, ρ_d 는 저면의 건조밀도, a_1, a_2, a_3, a_4 는 접합곡선 산정에 사용되는 계수이다. 본 연구에서는 식 (2)를 이용하여 저면깊이에 따른 저면밀도 변화에 대한 접합곡선이 저면의 상층부($0 < z < 1.7$ cm)와 하층부($z > 1.7$ cm)로 구분되어 산정되었으며, 대표적인 예로 Test #2의 결과가 Fig. 2에 주어진다. Fig. 2에 제시된 바와 같이, 저면의 밀도는 깊이가 깊어질수록 밀도가 증가하는 퇴적저면의 일반적인 특징을 잘 보여주고 있으며, 이는 모든 실험결과에서 동일하게 나타났다. 저면의 상층부($0 < z < 1.7$ cm)와 하층부($z > 1.7$ cm)의 밀도분포에 따라 적용된 각기 다른 계수 값은 Table 5에 주어진다.

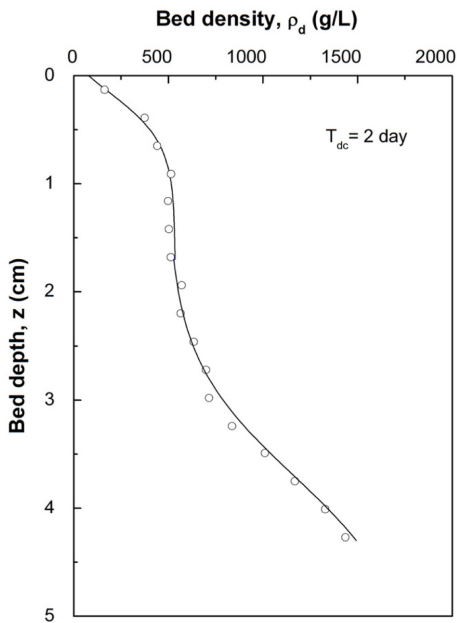


Fig. 2. Variation of bed density with depth (Test #2).

Table 5. Coefficients for fitting curve of bed density (Test #2)

Bed depth, z	a_1	a_2	a_3	a_4
$0 < z < 1.7$ cm	350.5	2.07	-0.15	185.30
$z > 1.7$ cm	670.1	0.90	-3.70	1163.76

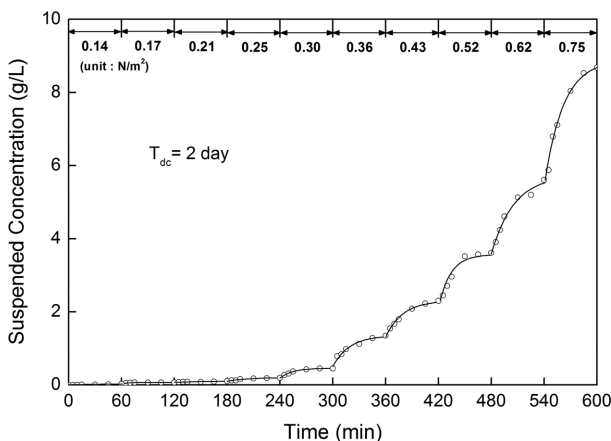


Fig. 3. Variation of suspended concentration (Test #2).

5.2 시간에 따른 부유사 농도의 변화

시간에 따른 수조 내 부유사 농도 변화의 대표적인 예로 Test #2의 결과가 Fig. 3에 주어진다. 균일저면의 경우, 시간에 따라 동일 비율로 침식되어 부유사 농도가 선형적으로 증가하는 반면에, 퇴적저면에서는 초반에 침식이 급격하게 진행되어 부유사 농도가 증가하다가 시간이 지남에 따라 침식이 점차 감소하여 부유사 농도가 일정해지는 경향을 보인다. Fig. 3에 제시된 결과는 이러한 현상을 잘 보여주고 있으며, 단계가 진행됨에 따라 점차적으로 증가하는 바닥전단응력에 의해 부유사량 또한 연속적으로 증가하는 것으로 나타났다. 10단계에서 발생한 붕괴침식(Mass erosion)은 흐름에 의한 바닥전단응력이 저면의 전단강도보다 커짐으로써 발생한 것으로 판단된다.

5.3 침식깊이 및 저면전단강도 산정

바닥전단응력에 대응하는 침식깊이까지 침식되는 동안 수층의 부유사 농도는 침식량에 의해 증가되므로, 저면의 침식량(Δz)과 수층의 부유사 변동량(ΔC)은 다음의 관계식으로 표현될 수 있다(Parchure, 1984).

$$\Delta C \times h = \rho_d(z) \times \Delta z \quad (3)$$

여기서, h 는 수층의 깊이를 나타낸다. 식 (3)에서 저면의 침식량은 앞서 제시된 식 (2)에 의해 z 의 함수로 표현될 수 있으므로, 침식깊이와 부유사 농도는 다음과 같은 관계를 가진다.

$$C = \frac{1}{h} \int_0^z \rho_d(z) dz = \frac{1}{h} \left(\frac{a_1}{a_2} \ln(\cosh a_2(z + a_3)) + a_4 \right) \quad (4)$$

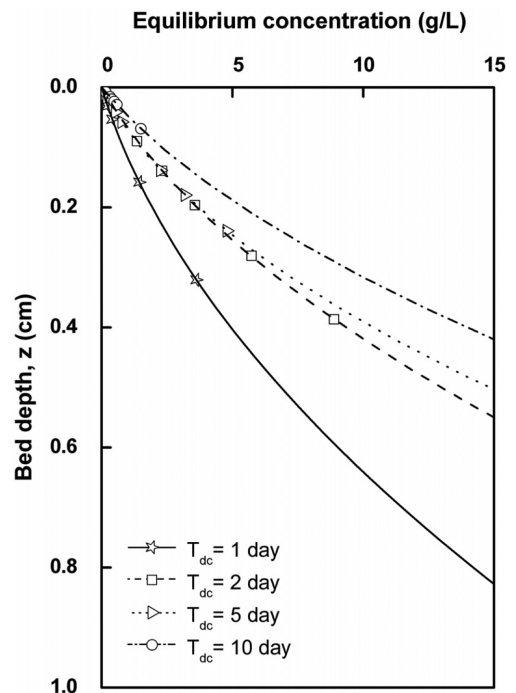


Fig. 4. Variation of depth-averaged concentration with bed depth.

식 (4)로부터 산정된 단계별 바닥전단응력에 대한 평형농도 C_{eq} 에 상응하는 침식깊이 z 가 산정되어 그 결과가 Fig. 4 및 Table 6에 제시된다.

한편, 저면전단강도 τ_s 는 부유사농도가 평형에 도달했을 때 가해지는 바닥전단응력과 동일한 값을 가진다. Table 6에 제시되는 바닥전단응력은 대응하는 침식깊이에서의 저면전단강도 τ_s 와 동일하다고 할 수 있으며, 이로부터 저면의 침식깊

이에 따른 저면전단강도 τ_s 의 변화에 대한 접합곡선이 식 (5)에 의해 산정되어 그 결과가 Fig. 5에 주어진다.

$$\tau_s(z) = b_1 \times \exp(-z/c_1) + b_2 \times \exp(-z/c_2) + d \quad (5)$$

여기서, b_1 , b_2 , c_1 , c_2 및 d 는 접합곡선 산정을 위한 임의의 계수값이며, 각 실험조건별 계수값은 Table 7에 제시된다.

5.4 잉여전단응력에 따른 침식률의 변화

침식률은 단위면적당 침식된 유사질량의 시간변화율을 전체 깊이에서의 부유사 농도의 시간변화율로 변환시킴으로써 얻을 수 있으며, 이는 다음의 식 (6)과 같이 표현된다.

$$\varepsilon = \frac{\partial m}{\partial t} = h \frac{\partial C}{\partial t} \quad (6)$$

여기서, m 은 단위 저면 표면적당 침식된 유사의 질량을 나타낸다. 앞서 Fig. 5에 제시된 저면전단강도 τ_s 의 접합곡선으로부터 임의의 저면깊이 z 에서의 잉여전단응력 $\tau_b - \tau_s$ 을 산정하고 부유사 농도 단면도를 통해 식 (6)을 이용하여 각각의 침식률 ε 이 산정되었다.

한편, 퇴적저면의 침식률(Erosion rate)과 잉여전단응력 $\tau_b - \tau_s$ 의 상관관계는 다음의 식 (7)을 이용하여 표현될 수 있

Table 6. Equilibrium concentration and depth of erosion by the bottom shear stress

Test No.	τ_b (N/m ²)	C_{eq} (g/L)	z (cm)
1	0.14	0.109	0.0152
	0.17	0.203	0.0277
	0.21	0.230	0.0311
	0.25	0.410	0.0534
	0.30	1.440	0.1579
	0.36	3.625	0.3207
2	0.14	0.028	0.0023
	0.17	0.060	0.0048
	0.21	0.108	0.0086
	0.25	0.197	0.0154
	0.30	0.454	0.0339
	0.36	1.350	0.0895
	0.43	2.305	0.1392
	0.52	3.564	0.1963
	0.62	5.732	0.2809
	0.75	8.885	0.3865
3	0.14	0.024	0.0021
	0.17	0.049	0.0043
	0.21	0.088	0.0076
	0.25	0.135	0.0116
	0.30	0.200	0.0168
	0.36	0.524	0.0412
	0.43	0.770	0.0578
	0.52	2.243	0.1380
	0.62	3.189	0.1793
	0.75	4.786	0.2392
4	0.14	0.003	0.0001
	0.17	0.050	0.0026
	0.21	0.058	0.0030
	0.25	0.075	0.0039
	0.30	0.146	0.0076
	0.36	0.309	0.0157
	0.43	0.389	0.0196
	0.52	0.474	0.0237
	0.62	0.584	0.0289
	0.75	1.499	0.0688

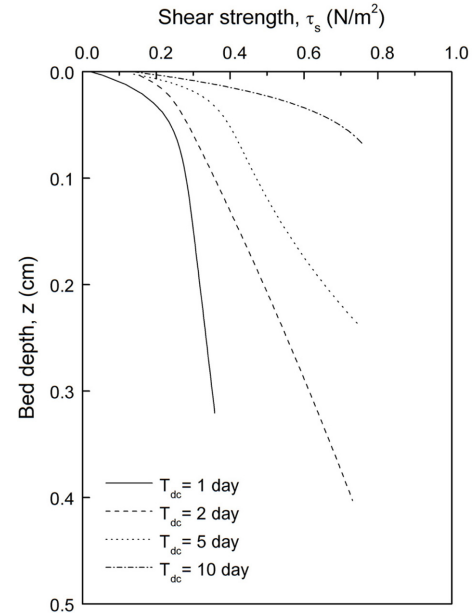


Fig. 5. Depth-variation of bed shear strength.

Table 7. Coefficient for fitting of shear strength

Test No.	b_1	b_2	c_1	c_2	d
1	-7470.24	-0.22	22322.18	0.02	7470.49
2	-1.98	-0.09	1.33	0.01	2.20
3	-0.25	0.23	0.01	-0.23	0.13
4	-0.35	-0.35	0.03	0.03	0.84

다(Parchure and Mehta, 1985).

$$\varepsilon = \varepsilon_f \exp[e_1(\tau_b - \tau_s)^{e_2}] \quad (7)$$

여기서, ε_f 는 *floc*의 침식률, e_1 및 e_2 는 경험계수이며, Parchure and Mehta (1985)는 e_2 의 값으로 0.5를 사용한 바 있다.

본 연구로부터 도출된 압밀시간 T_{dc} 별 산정된 침식률 결과 및 식 (7)을 이용하여 도출된 침식률 ε 과 잉여전단응력 $\tau_b - \tau_s$ 의 관계곡선이 Fig. 6에 주어진다. 데이터의 분산도가 다소 크기는 하나, 잉여전단응력 $\tau_b - \tau_s$ 이 $0.05 \sim 0.50 \text{ m}^2/\text{N}$ 로 증가할 때 침식률은 $0.2 \sim 511.75 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{min}$ 로 로그함수적으로 증가하였으며, ε_f 와 e_1 은 각각 $0.19 \times 10^{-5} \text{ g/cm}^2 \cdot \text{min}$, $15.84 \text{ m}^2/\text{N}$ 로 산정되었다.

한편, Kim et al. (2014)은 식 (7)을 이용하여 침식률을 산정할 때 낮은 잉여전단응력 구간에서 데이터의 분산도가 다소 크게 나타나는 점을 보완하기 위하여, 식 (7)을 확장하여 2차 항이 추가된 형태의 침식률 공식을 제안한 바 있다. 개선된 퇴적저면 침식률 공식은 식 (8)과 같다.

$$\varepsilon = \varepsilon_f \exp[e_1(\tau_b - \tau_s)^{e_2}] \exp[e_3(\tau_b - \tau_s)^{2e_2}] \quad (8)$$

본 연구에서 식 (8)을 적용하여 도출된 침식률 ε 과 잉여전단응력 $\tau_b - \tau_s$ 의 관계곡선은 Fig. 6에 함께 주어진다. ε_f 와 e_1 , e_3 는 각각 $0.001 \times 10^{-5} \text{ g/cm}^2$, 54.75, -71.33으로 산정되었으며, e_2 는 앞서와 동일하게 Parchure and Mehta (1985)에 의해 사용되었던 0.5를 적용하였다.

Fig. 6에서, 잉여전단응력이 약 $0.2 \text{ m}^2/\text{N}$ 보다 작은 구간에서 식 (7) 및 (8)을 이용한 접합곡선의 차이가 크게 나타나고 있는데, 이러한 차이는 침식률이 작아질수록 더 크게 나

타난다. 이는 Kim et al. (2014)이 제시한 바와 같이, 침식실험 수행시 적용되는 바닥전단응력 τ_b 의 초기값이 0.1 N/m^2 로 이보다 작은 바닥전단응력에서의 측정이 어려울 뿐만 아니라 수층의 부유사농도 및 저면밀도 ρ_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 어려울 것으로 판단되며, 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.

5.5 과거 연구결과와의 비교검토

본 연구에서 산정된 새만금 점착성 퇴적물의 퇴적저면에 대한 침식특성 결과는 Parchure (1984) 및 국내 최초로 고령토를 이용하여 퇴적저면 침식실험을 수행한 Kim et al. (2014)의 결과와 비교·검토가 이루어진다. 본 연구에서 도출된 새만금 점착성 퇴적물의 퇴적저면에 대한 침식특성 산정결과와 함께 Francis lake (Parchure, 1984) 및 고령토 퇴적물(Kim et al., 2014)의 침식특성 산정결과가 Fig. 7에 주어진다.

Fig. 7은 새만금 및 Francis lake, 고령토 퇴적물의 퇴적저면에 대한 침식률의 변화를 각각 보여주는데, 이들 결과는 증가하는 잉여전단응력에 대하여 침식률 역시 로그함수적으로 증가하는 형태를 보여주고 있다. 그러나 정량적으로는 상당히 다른 값을 갖는 것으로 나타났는데, 이러한 이유는 염도, 수온

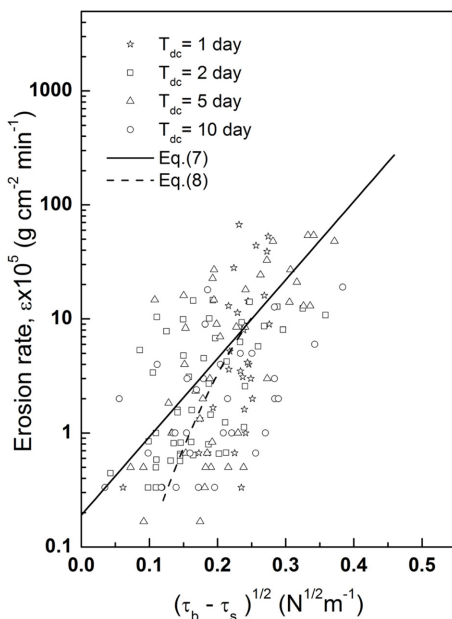


Fig. 6. Estimation of erosion rate.

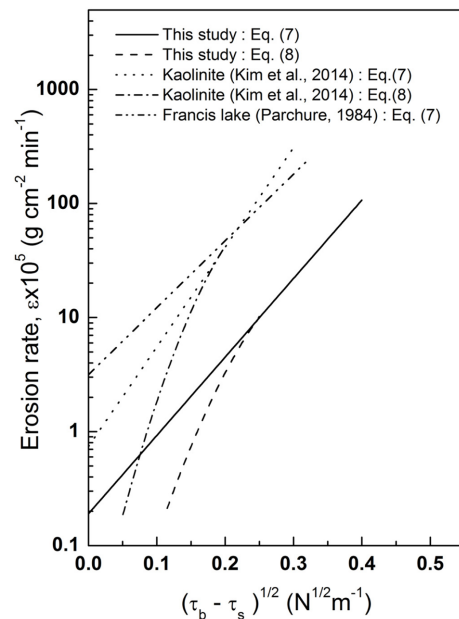


Fig. 7. Comparison of erosion rate.

과 같은 유체의 특성 및 입경분포, 광물질 구성성분과 같은 퇴적물 자체의 물리·화학적 특성의 차이에 의한 것으로 판단된다.

먼저, Kim et al. (2014)에 의해 수행된 고령토 퇴적저면의 침식실험에서는 수도물(Tap water)이 침식수로 사용되었으나, 본 연구에서는 실험 전 과정에 걸쳐 현장에서 채취된 침식수가 실험에 사용되었다. 본 연구에서 사용된 침식수의 염도는 약 27.2 ‰인데, 일반적으로 염도 조건에서 점착성 퇴적물의 입자들은 입자간의 응집력이 증가하여 염도가 없는 조건에서 보다 더욱 조밀한 구조적 결합을 가지는 것으로 알려지고 있다. 이러한 이유로 입자간의 새만금 점착성 퇴적물의 응집력이 증가하여 결과적으로 더 작은 침식률을 갖게 된 것으로 해석될 수 있다.

침식률의 정량적인 차이는 퇴적물 자체의 물리·화학적 특성과도 연계하여 정성적으로 분석될 수 있다. 앞서 Fig. 7에 도식된 새만금 및 Francis lake, 고령토 점착성 퇴적물의 물리화학적 특성이 비교되어 Table 8에 제시된다.

Table 8에서 새만금 점착성 퇴적물의 평균입경은 9.0 μm 로 고령토 퇴적물의 평균입경인 12.6 μm 보다 약 1.3배 작은 것으로 나타났다. 반면, 광물질 구성성분은 새만금 점착성 퇴적물의 경우에 석영이 주된 광물이다. 유기물 함량은 새만금 점착성 퇴적물이 고령토에 비해 약 1.9배 작은 값을 갖기는 하나, 거의 동일한 수준의 소량에 해당한다.

일반적으로 점착성 퇴적물은 평균입경이 작을수록, 그리고 유기물 함량이 클수록 점착력이 증가하는 경향이 있으며, 또한 광물학적 측면에서 보면, 보편적으로 점착성 퇴적물에 많이 함유되어 있는 고령토, Illite, 녹니석 등의 광물성 점토보다 석영이 훨씬 작은 점착력을 갖는다(Mehta, 2013; Lick and McNeil, 2001). 유기물 함량의 차이는 동일 수준의 소량에 해당하므로 유기물 함량에 대한 부분은 차치하고, 고령토에 비해 입경이 더 세립한 것으로 나타난 새만금 점착성 퇴적물 시료가 더 큰 점착력을 가질 것으로 판단된다. 퇴적물의 점착력이 크다는 것을 개개의 토사입자의 결합력이 더 강하고 결과적으로 침식률이 더 작다는 것을 의미하므로, 상대적으로 큰 점착력을 갖는 새만금 퇴적물의 침식률이 더 작은 값을 갖게 되었다고 해석할 수 있다. 이러한 분석결과에 비추어 볼 때, 본 연구에서 산정된 새만금 퇴적저면의 침식특성은 타당하다고 할 수 있다.

한편, Francis lake 퇴적물과의 침식특성 비교는 동일 원리로 설명될 수 없는 것으로 판단된다. Parchure (1984)는 광

물질 구성성분을 제시하기는 하였으나 정량적으로 제시하지는 않았으므로 광물질 주성분을 판단할 수는 없으며, 유기물 함량의 경우 모든 퇴적물이 미미한 값을 가지므로 이에 대한 내용을 언급되지 않는다. 평균입경을 살펴보면, 새만금 점착성 퇴적물의 평균입경은 Francis lake 퇴적물보다 약 1.2배 큰 값을 가지므로 결합력이 더 작아 침식률이 클 것으로 판단되나, Fig. 7에서는 Francis lake 퇴적물의 침식률이 훨씬 큰 것으로 나타났다. 이와 같이 상이한 결과가 나타나는 이유는 본 연구에서 제시된 퇴적물 자체의 물리·화학적 특성의 기본 조사항목인 입경분포, 유기물함량 및 광물질 구성성분 이외의 특성에 의한 영향일 것으로 판단된다. Mehta (1986)는 기본항목 이 외에 양이온 전도율(Cation Exchange Capacity, CEC), 컨시스턴시 특성, 전단특성 등을 포함한 8가지 항목을 물리화학적 기본특성 조사항목으로 제시한 바 있으며, Berlamont et al.(1993)은 생물학적 특성까지 포함된 총 28개의 항목을 필수 조사항목으로 제시하였다. 앞서 제시된 바와 같이, 점착성 퇴적물의 이송특성은 입자간의 응집 현상에 의해 크게 영향을 받으므로, 입자간의 응집 강도를 나타내는 지표로 사용될 수 있는 인자들을 다양하게 측정하고 이와 연계하여 퇴적물의 침식특성을 해석하려는 노력이 필요할 것으로 판단된다.

점착성 퇴적물의 정량적 차이가 의미하는 바는 점착성 퇴적물의 퇴적저면에 대한 침식실험시 퇴적물의 형태와 침식수의 특성에 따라 침식특성이 지역적으로 크게 변화할 수 있다는 것이다. 이러한 사실은 타 지역 퇴적물의 침식률 측정자료는 특정지역에서의 점착성 퇴적물의 이동예측을 위한 수치 모형 실험시에 사용될 수 없다는 것을 나타내며, 결론적으로 침식률 산출을 위한 현장관측이나 실내실험이 각 조사대상 지역에서 반복적으로 수행되어야 한다는 것을 의미한다. 아울러 최근 미국 및 유럽연합 등의 여러 국가에서 다양한 실험장치를 이용하여 현장특성이 반영된 퇴적물의 이송특성을 조사하기 위한 실험들이 수행되고 있으나 국내에서는 이에 대한 연구가 미미한 실정이므로, 퇴적물의 이송특성 해석시 현장특성이 반영된 퇴적저면 시료를 이용한 실험을 수행함으로써 타당한 이송특성 매개변수 값이 도출되도록 해야 할 것이다.

6. 결 론

본 연구에서는 새만금 점착성 퇴적물의 퇴적저면 침식특성을 정량적으로 산정하기 위하여 환형수조를 이용한 침식실험이 수행되었다. 각기 다른 압밀시간에서 총 4회의 퇴적저면 조건하 침식실험이 수행되었으며, 퇴적저면의 침식률이 정량적으로 산정되었다. 또한, 과거 연구결과와의 비교검토를 통하여 실험결과의 타당성이 간접적으로 입증되었다.

본 연구결과에 따르면, 새만금 점착성 퇴적물과 염수를 이용하여 구성된 탁수는 압밀에 의해 깊이가 깊어질수록 저면 밀도가 증가하였으며, 또한 압밀시간이 길어질수록 저면밀도

Table 8. Comparison of physico-chemical properties of sediments

Properties item	Saemankeum (This study)	Francis Lake (Parchure, 1984)	Kaolinite (Kim et al., 2014)
평균입경(μm)	9.0	7.5	12.6
광물질 주성분	Quartz	-	-
유기물함량(%)	3.0	1.2	5.7

도 증가하는 것으로 나타났다. 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 검증되었다. 점착성 퇴적물의 침식특성은 지역적으로 현저한 차이를 보이는 것으로 확인되었는데, 과거 Ryu et al. (2006), Hwang et al. (2008)에 의해 수행된 균일저면 조건에서의 실험결과와 마찬가지로 퇴적저면 조건에서의 침식특성 또한 지역적으로 큰 차이를 보이는 것으로 나타났다.

한편, 본 연구에서 산정된 침식률 결과에서는 잉여전단응력이 0.2 N/m^2 이상인 경우에는 침식률의 \log 값과 잉여전단응력은 선형적 관계에 있으나, 0.2 N/m^2 이하에서는 잉여전단응력이 작아질수록 침식률이 급격하게 작아지는 경향을 보이는 것으로 나타났다. 이러한 경향을 잘 반영하는 Kim et al. (2014)의 침식률 공식이 적용되었으며, 자연시료를 이용한 퇴적저면 침식실험에서도 Kim et al. (2014)의 침식률 공식이 적용 가능함을 확인하였다.

본 연구는 국내 최초로 수행된 자연시료를 이용한 퇴적저면의 침식특성 연구로서 큰 의의를 가진다. 과거 상용 고령토를 이용한 퇴적저면 침식실험이 수행된 바 있으나, 현장 시료를 이용한 퇴적저면 침식특성에 대한 연구는 국내에서 수행된 바 없다. 본 연구로부터 도출된 결과는 향후 자연 상태의 퇴적저면 조건에서의 침식특성 산정을 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것이며, 나아가 퇴적물의 이송특성 해석에 대한 수치모형 프로그램시 요구되는 입력자료로 크게 활용될 수 있을 것이다.

한편, 새만금 해역에서의 대규모 개발이 활발히 이루어짐에 따라 해수유동 체계의 변화 및 이에 따른 2차적인 제반 퇴적환경의 변화가 예상되므로, 향후 새만금 해역 점착성 퇴적물의 침식특성 추가실험을 통하여 새만금 개발에 따른 침식특성의 변화에 대한 연구가 수행되어야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통기술지역특성화사업 연구개발사업의연구비지원(14RDRP-B079706-01)에 의해 수행되었습니다.

References

- Hwang, K.-N., Kim, H.-M. and Ahn, I.-J. (2008). A laboratory study on erosional properties of fine cohesive sediments from Saemankeum artificial lake. *Journal of Korea water resources association*, 41(5), 473-482 (in Korean).
- 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. and So, S.-D. (2002). An investigation on erosional properties of kaolinite sediments using annular flume, Conf. of KSCE., Korean Society of Civil Engineers, Busan, Korea (in Korean).
- Hwang, K.-N., So, S.-D. and Kim, T.-M. (2005). An experimental study for estimation of erosion rate of fine cohesive sediments. *Journal of Korean society of coastal and ocean engineers*, 17(2), 119-128 (in Korean).
- Kim, Y.-M., Kim, H.-M., Hwang, K.-N. and Yang, S.-H. (2014). A Laboratory study on erosional properties of the deposit bed of kaolinite sediments. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, 34(4), 1181-1190 (in Korean).
- Lee, J.Y. (2001). A study on settling properties of muddy sediments from Saemankeum, West coast of Korea. Master's theses, Chonbuk National University.
- Lick, W., McNeil, J. (2001). Effects of sediment bulk properties on erosion rates. *J. of science of the total environment*, Vol. 266, 41-48.
- 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. 290-325.
- Mehta, A.J. (2013). An introduction to hydraulics of fine sediment transport. World scientific.
- National Fisheries Research & Development Institute (1997). Method of process test of marine environment. The Korean Society of Oceanography (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.

Received 6 March, 2015

Revised 6 April, 2015

Accepted 8 April, 2015