

염도 존재시 고령토 퇴적물의 퇴적특성 산정에 관한 실험적 연구

The Laboratory Study on Estimation of Depositional Properties of Kaolinite Sediments on Saltwater Condition

황 규 남* / 김 남 훈** / 이 영 호***

Hwang, Kyu-Nam / Kim, Nam Hun / Lee, Yong Hao

Abstract

In this study, a series of deposition tests have been conducted on saltwater condition (salinity 32 ‰) using an annular flume, in order to estimate depositional properties of kaolinite sediments and to analyze the effect of the initial concentration on them. Total 37 deposition tests have been carried out in three different initial concentrations (1000, 5000, 15000 ppm) with varying the bed shear stress. From these test results, minimum shear stress (or critical shear stress for deposition; τ_{bmin}) and the deposition rate parameters (σ_1 , $(\tau_b^* - 1)_{50}$, σ_2 , t_{50}) for kaolinite sediments have been quantified, and the effects of the initial concentration and salinity on depositional properties of cohesive sediments have been analyzed qualitatively. As the results, τ_{bmin} , σ_1 and $(\tau_b^* - 1)_{50}$ are found to be 0.147, 0.74 and 0.65 N/m² respectively. Through comparing with results from previous studies, the performance of this study and tests results are shown to be good enough to verify.

keywords : deposition rate, cohesive sediments, minimum shear stress, critical shear stress for deposition, salinity effects, initial concentration effects

요 지

본 연구에서는 환형수조를 이용한 일련의 퇴적실험을 수행하여, 염수조건(32 ‰)에서의 고령토 퇴적물의 퇴적특성 산정 및 퇴적특성에 미치는 초기농도의 영향을 분석·검토하였다. 바닥전단응력을 변화시키면서 각기 다른 3가지 초기농도조건(1000, 5000, 15000 ppm)에서 총 37회의 퇴적실험이 수행되었으며, 퇴적실험 결과로부터 염수조건에서 고령토 퇴적물의 최소전단응력(또는 퇴적한계전단응력; τ_{bmin})과 퇴적률 매개변수들(σ_1 , $(\tau_b^* - 1)_{50}$, σ_2 , t_{50})의 정량적 산정 및 초기농도와 염도의 영향에 대한 정성적 분석이 수행되었다. 그 결과, τ_{bmin} , σ_1 및 $(\tau_b^* - 1)_{50}$ 은 각각 0.147, 0.74, 0.65 N/m²로 산정되었으며, 과거 타 연구결과와의 비교·검토를 통하여 본 실험에서 도출된 결과의 타당성이 입증되었다.

핵심용어 : 퇴적률, 점착성 퇴적물, 최소전단응력, 퇴적한계전단응력, 염도의 영향, 초기농도의 영향

* 교신저자 · 전북대학교 토목공학과 · 공업기술연구센터 부교수
Associate Prof., Dept. of Civil Engrg., Chonbuk Nat'l Univ., Jeonju 561-756, Korea
(e-mail: khwang@chonbuk.ac.kr)

** 항도 엔지니어링 항만부 대리
Assistant manager., HANGDO ENG., Seoul 152-050

*** 대우건설 토목사업본부 사원
DAEWOO E&C., Seoul 100-714, Korea

1. 서 론

최근 동북아 중심국가 건설계획 아래 진행되고 있는 신항만 건설 및 연안매립과 같은 대규모 개발 공사로 인한 연안 해역에서의 해수유동 변화는 해저 지형 및 생태계의 변화, 해빈침식 등의 문제를 야기시키고 있다. 특히 하구에서의 갯벌 점착성 퇴적물의 과다 퇴적으로 인한 항로 매몰 현상과 환경오염 문제는 전 세계적으로 그 문제점이 심각하게 제기되고 있는 실정이며, 이러한 문제의 해결을 위하여 갯벌 점착성 퇴적물의 이동특성에 대한 이해는 필수적 요구 사항이라 할 수 있다.

특히, 점착성 퇴적물의 퇴적 특성은 항로매몰 및 오염퇴적도의 환경문제 등을 위해 필수적으로 조사되어야 할 중요한 인자로서, 최근 미국 및 유럽 연합 등 여러 국가에서는 다양한 실험 장치들을 이용하여 흐름조건과 퇴적물의 침식/퇴적간의 역학 관계를 조사하기 위한 많은 현장 및 실내 실험들이 수행되어져 왔다.

그러나 국내의 경우 점착성 퇴적물의 퇴적특성에 대한 실험 및 현장관측은 매우 미미한 실정으로, 과거 김재중(1989)은 직선수조를 이용하여 점착성 퇴적물의 퇴적특성을 파악하고자 하였으나, 재순환 펌프의 날개에 의해 응집된 부유토사들이 쉽게 분리되는 직선수조의 한계 및 장비부족으로 인하여 퇴적특성의 정량적 산정에는 실패하였다. 한편, 직선수조의 단점을 배제하기 위하여 수행된 최근의 국내 연구로는 박상용(2004), 황규남과 양수현(2007)을 들 수 있는데, 박상용(2004)은 국내 최초로 제작된 전북대 환형수조를 이용하여 고령토를 이용한 퇴적실험을 수행하였으나 잘못된 접근방법으로 인하여 산정된 결과들은 타당성 있는 범위를 벗어나는 값으로 해석되었다. 한편, 황규남과 양수현(2007)은 황규남과 소상돈(2002)에 의해 검증된 환형수조와 고령토를 이용하여 퇴적실험을 수행하였으며, 과거 타 연구결과와의 비교·분석을 통하여 도출된 실험결과 및 실험장치의 타당성을 검증하였다. 그러나 황규남과 양수현(2007)의 고령토를 이용한 퇴적실험은 염도가 0인 수돗물 조건에서 주로 수행되었으며, 염수 조건에서의 퇴적실험은 구체적으로 수행된바 없으며, 일반적으로 자연 상태의 갯벌 점착성 퇴적물은 일정 염도를 갖는다는 점을 고려할 때, 염수 조건에서의 퇴적특성 조사 및 그 결과의 타당성 검증은 필수적 사항이라 할 수 있다. 또한 황규남과 양수현(2007)은 미세 점착성 퇴적물의 퇴적특성이 초기농도와 무관하다는 가정 하에 단지 1000 ppm의 동일 초기농도 조건에서만 퇴적실험을 수행하였는데, 이러한 가정의 타당성에 대한 구체적인 검증이

생략된 상태로 초기 농도에 따른 퇴적특성의 변화 유무에 대한 체계적 검증 또한 필수적이라 할 수 있다.

이에 본 연구에서는 환형수조를 이용하여 염수조건에서 고령토 퇴적물의 퇴적특성 매개변수를 정량적으로 산정하고 과거 타 연구결과와의 비교·검토를 통하여 본 실험에서 도출된 결과의 타당성을 입증하였다. 또한 초기 농도에 따른 퇴적특성의 변화를 알아보기 위하여 각기 다른 3가지 조건의 초기농도(1000, 5000, 15000 ppm)에서 주어진 바닥전단응력의 변화에 따라 시간에 따른 수층 부유사 농도를 측정함으로써 각 초기농도별 수층 부유사의 퇴적률을 산정하였으며, 퇴적률과 바닥전단응력 사이의 관계로부터 염수 조건에서의 고령토 퇴적물의 최소전단응력 산정 및 퇴적특성에 미치는 초기농도의 영향에 대하여 정성적 분석을 수행하였다. 또한, 본 연구결과와 과거 수돗물 조건에서 고령토 퇴적물의 퇴적특성을 산정한 황규남과 양수현(2007) 결과와의 비교·검토를 통하여 퇴적률에 미치는 염도의 영향에 대한 정성적 분석을 수행하였다.

2. 퇴적시료의 특성

2.1 고령토의 특성

본 연구에서는 염수 조건에서 고령토 퇴적물 퇴적특성을 정량적으로 산정하고 퇴적특성에 미치는 초기농도·염도의 영향을 파악하기 위하여 과거 수돗물 조건에서 퇴적실험을 수행한 황규남과 양수현(2007)과 동일한 고령토를 사용하여 퇴적실험을 수행하였다.

본 실험에서 사용된 고령토의 입경분포 결과는 Fig. 1에 주어지며, 한국화학시험 연구원에 의해 조사된 고령토의 성분적 특성분석 결과는 Table 1에 주어진다.

2.2 퇴적수의 특성

퇴적수라 함은 퇴적실험시에 수조 내에 조성되는 수층 탁수를 구성하는 물을 의미하며, 과거 점착성 퇴적물의 퇴적특성 연구에서는 그 연구 목적에 따라 염수, 증류수, 담수, 수돗물 등 다양한 유수들이 퇴적수로 사용되어 왔다. 본 연구에서는 염수 조건에서의 고령토 퇴적물의 퇴적특성을 파악하기 위하여 수돗물과 순도 98 %의 상업용 정제소금을 혼합하여 32 %의 염도를 갖는 퇴적수를 제작하였으며, 이를 사용하여 퇴적실험을 수행하였다. 본 연구에서 사용된 수돗물의 화학적 성분의 함유량은 과거 한국수자원공사 충청권 수질검사에 의해 분석된 바 있으며, 그 분석결과에 의하면 pH는 7.0이고, 각 화학성분들의 함유량은 Table 2와 같다.

Table 1. Characteristics of Kaolinite

Specification	Unit	Content	Method
Whiteness	-	93.9	KSL 5113-97
SiO ₂	%	71.5	KSE 3805-96
Al ₂ O ₃	%	18.0	
Ig. loss (Organic content)	%	5.70	
Fe ₂ O ₃	%	0.20	KSF 3805-96 (I. C. P)
CaO	%	2.40	
MgO	%	0.05	
pH (20% water solution)	-	8.50	KSF 2103-93
apparent specific gravity	-	0.58	KSA 0602-95
residue(sieve No. 325)	%	0	KSA 5301-95
moisture	%	0.26	

Table 2. Chemical Characteristics of Tap Water

Chemical Component	Content(ppm)
Cl ⁻	11
NO ₃ ⁻ N	0.7
SO ₄ ⁻²	3
Zn	0.006
THMs	0.026
Chloroform	0.02

3. 퇴적 실험

3.1 실험방법

본 연구에서 퇴적실험은 진북대 환형수조를 이용하여 수행되었으며, 환형수조에 대한 구조적 특성 및 흐름특성 등에 대한 자세한 사항은 황규남 등(2005)에 주어진다. 퇴적실험에 앞서, 균일한 부유사 농도를 갖는 탁수를 제작하기 위해, 고령토와 수돗물을 혼합하여 미리 설정된 부유사 농도(초기농도 1000, 5000, 15000 ppm)를 갖는 탁수가 준비되었다. 또한 준비된 탁수는 전체 깊이에서 균일한 농도를 갖도록 믹서기와 에어펌프를 이용하여 충분히 혼합하여 환형수조 내로 옮겨졌으며, 수조안에 수층이 완전히 조성된 후 상부 링의 높이를 조절하여 수면에 충분히 접하도록 하였다.

퇴적실험은 Mehta and Partheniades(1975)가 채택한 방법을 따라, 상부 링과 수면이 충분히 접촉된 상태에서 수조가 가지는 최대 속도로 상부 링을 회전시켜 최대바닥전단응력으로 수층 흐름을 발생시킨 후, 기 설정된 바닥전단응력을 갖도록 링의 회전속도를 낮춰 수층의 흐름을 느리게 조정하는 방법으로 수행되었다. 한편, 본 연구에서 퇴적실험 동안 수층 부유사 농도의 변화는

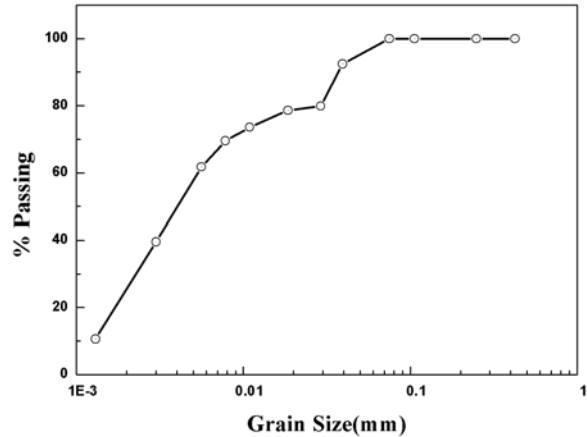


Fig. 1. Grain Size Distribution of Kaolinite

수층의 각기 다른 2개의 높이(수조 바닥으로부터 각각 4 cm와 7 cm)에서 water sampling 방법으로 측정되었으며, 퇴적실험 전체 과정 및 부유사 농도 변화 측정에 대한 자세한 설명은 황규남과 양수현(2007)에 주어진다.

3.2 실험조건

본 퇴적실험에서는 각기 다른 탁수농도(초기농도 1000ppm, 5000ppm, 15000ppm)에서 바닥전단응력의 크기를 변화시키면서 총 37회의 퇴적실험이 수행되었으며, 바닥전단응력 변화에 대한 자세한 사항은 황규남 등(2005)에 주어진다. 모든 실험에서 퇴적수의 염도 및 수층의 높이는 32%, 10cm로 동일하게 유지하였으며, 각 퇴적실험 조건은 Table 3에 요약되어 주어진다.

4. 실험 결과

4.1 시간에 따른 부유사 농도의 변화

본 연구에서는 탁수농도가 각기 다른 조건에서 바닥전단응력의 변화를 주어 총 37회의 퇴적실험이 수행되었으며, 우선적으로 각 실험별로 시간에 따른 수조 내 수층부유사 농도 변화도가 작성되었다. 수조 내 수층 부유사 농도는 측정별 부유사 농도 값의 차이가 미미하므로 서로 다른 높이의 2개 측정의 평균값이 사용되었으며, 수층 부유사 농도 변화도 중에 1000 ppm 조건에서의 대표적인 예가 Fig. 2와 Fig. 3에 주어진다.

Fig. 2는 바닥전단응력 τ_b 가 0.08 N/m²일 때의 수층 부유사 농도 변화도로써, 수층 부유사 농도가 24시간이 경과한 후에 평형농도에 이르지 못하고 지수함수적으로 계속 감소하여 모두 퇴적되는 작은 바닥전단응력 하에서의 퇴적특성을 잘 보여준다. 한편, Fig. 3은 바닥전단응력 τ_b 가 0.2 N/m²일 때의 수층 부유사 농도 변화도로

Table 3. Experimental Conditions

(a) 1000ppm						(b) 5000ppm						(c) 15000ppm								
Test No.	Turbid concentration (ppm)	Initial concentration (ppm)	Shear stress _s (N/m ²)	Temp (°C)	Experimental time (hr)	Test No.	Turbid concentration (ppm)	Initial concentration (ppm)	Shear stress _s (N/m ²)	Temp (°C)	Experimental time (hr)	Test No.	Turbid concentration (ppm)	Initial concentration (ppm)	Shear stress _s (N/m ²)	Temp (°C)	Experimental time (hr)			
K1	1000	955	0.000	12-13	19.0	K15	5000	4860	0.000	11-12	15.0	K26	15000	14850	0.000	9-10	22.5			
K2		975	0.080	10-11	22.5	K16		4990	0.100	12-14	46.5	K27		15350	0.100	10-12	44.6			
K3		980	0.100	10-11	45.0	K17		5070	0.140	8-10	46.0	K28		15710	0.130	11-12	40.5			
K4		1115	0.120	9-10	47.3	K18		5295	0.150	10-11	44.7	K29		15670	0.140	9-12	48.0			
K5		1060	0.150	11-12	46.7	K19		5015	0.160	9-11	34.1	K30		16000	0.150	10-11	32.3			
K6		1130	0.160	10-11	47.3	K20		5210	0.175	9-10	18.5	K31		15805	0.160	10-11	47.6			
K7		918	0.175	11-12	19.0	K21		5060	0.200	11-12	34.5	K32		15285	0.175	7-8	22.0			
K8		1055	0.190	10-11	17.8	K22		5425	0.220	10-12	21.0	K33		15010	0.200	10-11	47.3			
K9		1035	0.200	11-12	20.7	K23		5000	0.250	9-10	33.5	K34		15135	0.220	9-11	18.8			
K10		940	0.220	13-14	19.0	K24		5010	0.300	8-9	23.2	K35		15230	0.250	10-11	34.0			
K11		960	0.230	11-12	18.5	K25		4980	0.500	10-11	11.3	K36		15270	0.300	8-10	16.8			
K12		1050	0.250	10-11	13.3							K37		16075	0.500	10-11	24.0			
K13		1045	0.300	10-11	14.5															
K14		1055	0.500	11-12	12.0															

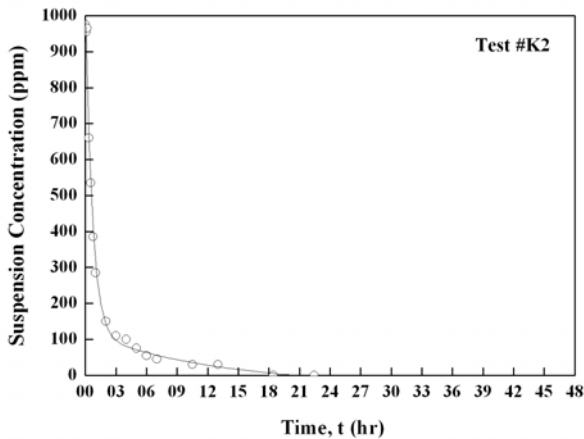


Fig. 2. Time-Concentration Variation of Test #K2 under Salt Water

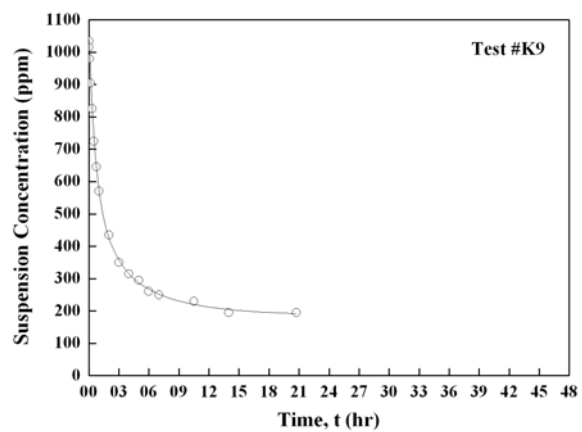


Fig. 3. Time-Concentration Variation of Test #K9 under Salt Water

써, 바닥전단응력이 비교적 큰 경우의 수층 부유사 농도 변화를 보여주고 있는데 그림에서 알 수 있는 바와 같이 부유사 농도가 초기에는 지수함수적으로 급격히 감소하다가 시간이 지남에 따라 일정 농도, 즉 평형농도에 도달하는 큰 바닥전단응력 하에서의 퇴적특성을 잘 나타내고 있다.

이러한 현상은 과거 Mehta and Partheniades(1975), Partheniades *et al.*(1966), 황규남과 양수현(2007) 등에 의해 관측되었는데, 그들은 일정 바닥전단응력 값 이하에서 모든 수층의 부유사가 퇴적되어 평형농도의 발생이 인식되지 못하고, 모든 수층의 부유사가 퇴적되는 최소전단응력 τ_{bmin} 이 존재하며, 이보다 큰 바닥전단응력 하에서 수층 부유사 농도는 궁극적으로 명백한 평형농도 C_{eq} (equilibrium concentration)에 도달하게 된다고 하였다.

4.2 수층부유사의 퇴적특성에 미치는 바닥전단응력의 영향

본 연구에서는 퇴적특성에 미치는 바닥전단응력의 영향을 분석하기 위하여, 각 실험별로 바닥전단응력의 크기를 변화시키면서 퇴적실험이 수행되었다. 탁수농도 1000 ppm의 저농도인 경우 총 14회의 퇴적실험에 대하여 각 바닥전단응력별 상대농도 변화도가 작성되었으며, 그 결과가 Fig. 4에 주어진다.

각 그림들에서는 앞의 4.1결과 달리, 농도 C 대신에 상대농도 C/C_0 가 도식되었는데, 이는 초기농도 C_0 가 평형농도 C_{eq} 와는 무관함을 의미한다. 퇴적거동에 미치는 바닥전단응력의 영향과 관련하여 Fig. 4는 2가지 중요한 결과를 제시하고 있다. 첫째는 $\tau_b > \tau_{bmin}$ 조건에서 농도 C는 명백히 평형농도 C_{eq} 에 도달하게 되고, $\tau_b < \tau_{bmin}$

조건에서는 모든 수층 부유사는 궁극적으로 퇴적하게 된다는 것이며, 둘째는 τ_b 가 커질수록 C_{eq} 의 값이 커진다는 사실이다.

Fig. 4를 자세히 살펴보면, 일정 바닥전단응력 이상에서는 수층 부유사농도 C 가 항상 C_{eq} 에 도달하고, τ_b 가 커질수록 C_{eq} 또한 커짐을 쉽게 알 수 있는 반면, 그 이하에서는 수층 부유사농도 C 가 C_{eq} 에 도달하지 못하고 계속적으로 감소하여 일정시간 이후에는 전부 퇴적됨을 알 수 있다.

4.3 수층부유사의 퇴적특성에 미치는 초기농도의 영향

본 연구에서는 퇴적특성에 미치는 초기농도의 영향을 알아보기 위하여 초기농도의 변화를 주어 퇴적실험을 수행하였으며, 실험한 결과의 상대농도 변화도가 Fig. 5와 Fig. 6에 주어진다. Fig. 5와 Fig. 6은 초기농도가 각각 5000 ppm과 15000 ppm인 경우인데 초기농도의 변화를 주어 실험한 결과에서도 앞서 Fig. 4에서와 같이 평형농도가 존재하며, 평형농도의 정량적 크기

는 다소 차이를 보이더라도 τ_b 가 커질수록 C_{eq} 또한 커짐을 알 수 있다. 따라서 이러한 특성을 고려할 때에 평형농도는 초기농도의 크기와는 무관하다고 할 수 있다.

4.4 수층부유사의 퇴적특성에 미치는 염도의 영향

본 연구에서는 수층 부유사의 퇴적물에 미치는 염도의 영향을 알아보기 위하여, 과거 퇴적수로 수돗물을 사용한 황규남과 양수현(2007)의 결과와 본 실험결과와의 비교·검토가 수행되었으며, 실험결과중 대표적인 예로써 수돗물 조건과 염수 조건에서의 대표적인 각 5개의 결과가 Fig. 7에 주어진다. Fig. 7은 초기농도와 바닥전단응력이 같고 염도가 각기 다른 경우인데, 이들 결과는 모두 동일 바닥전단응력 하에서 수층 부유사 농도가 수돗물에서 보다 염수 조건에서 더 작게 됨을 보여준다. 즉, 이러한 사실은 수층 부유사의 퇴적물이 수돗물보다 염수 조건에서 상대적으로 더 커서, 평형농도에 이르는 시간이 빨라지고, 염도 존재시에 τ_{bmin} 값은 상대적으로 작아진다는 것을 의미한다.

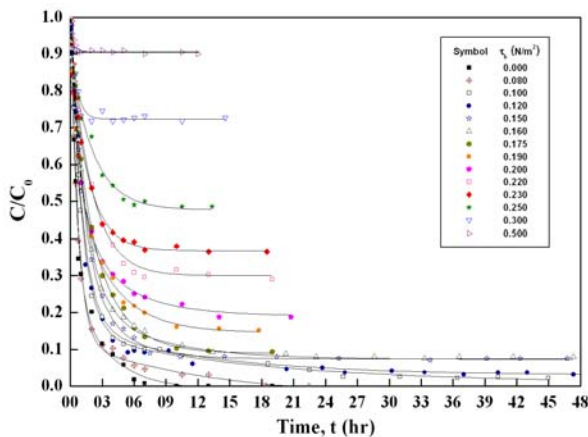


Fig. 4. Comparison of Variation of C/C_0 in Salt Water(C_0 : 1000 ppm)

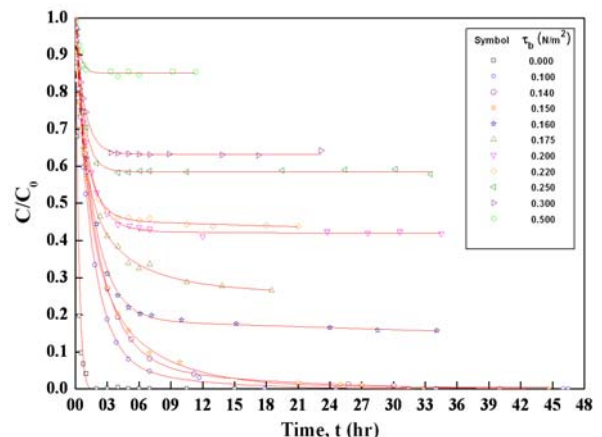


Fig. 5. Comparison of Variation of C/C_0 in Salt Water(C_0 : 5000 ppm)

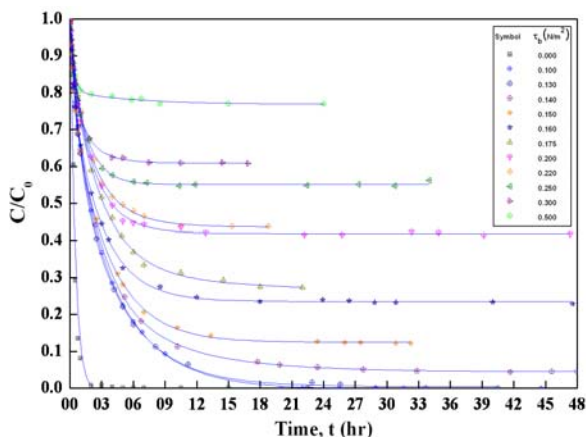


Fig. 6. Comparison of Variation of C/C_0 in Salt Water(C_0 : 15000 ppm)

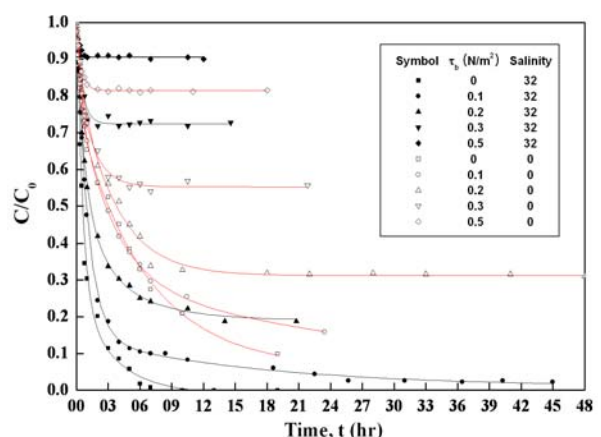


Fig. 7. Comparison of C/C_0 in Tap Water and Salt Water

일반적으로 염도의 존재 유무는 점착성 퇴적물 입자의 응집률에 영향을 미친다. 즉, 염도 존재시에 입자간의 응집률은 향상되며, 부유 입자들의 응집으로 형성된 플록들의 응집강도와 비중 또한 증가된다. 결과적으로 이는 염도 존재시에 증가된 플록의 강도와 비중으로 인하여 주어진 바닥전단응력 하에서도 파괴되지 않고 퇴적될 수 있는 강하고 무거운 플록들이 많이 형성될 수 있다는 것을 의미한다. 따라서, 이러한 사실에 비추어, 본 퇴적실험을 통하여 염도 0 %인 수돗물에서 보다 염도 32 %의 염수에서 더 큰 퇴적률과 더 작은 최소전단응력이 산정될 것이라 할 수 있다.

4.5 최소전단응력(τ_{bmin})의 산정 및 검토

앞서 Figs. 4~6으로부터 최소전단응력이 존재함이 확인되었는데, Mehta and Partheniades(1975)에 따르면, 최소전단응력 τ_{min} 은 평형농도의 발생 여부를 나타내는 지표로 퇴적발생의 유무를 나타내는 바닥전단응력의 한계값으로 정의된다고 주장하였다. 따라서, 최소전단응력을 기준으로 가해진 바닥전단응력의 크기에 따라 퇴적 특성이 다르게 될 것이므로, 최소전단응력의 정량적 산정은 매우 필수적 사항이라 할 수 있다.

이에 본 연구에서는 과거 Mehta and Partheniades(1975), 황규남과 양수현(2007)이 제시한 방법을 따라 최소전단응력이 산정되었다. 이를 위해 우선, 앞서 주어진 Figs. 4~6로부터 각 실험별로 평형농도의 존재 유무가 파악되었으며, 이로부터 바닥전단응력별 상대평형농도 C_{eq}/C_0 데이터가 산정되었다.

앞서 설명된 바와 같이, 최소전단응력은 평형농도가 존재하는 최소의 바닥전단응력으로 정의되므로, Fig 8에 도식된 바와 같이, 점함곡선이 바닥전단응력의 크기를 나타내는 횡좌표와 교차하는 점에서의 바닥전단응력 값이 최소전단응력으로 정의되며, 본 연구에서 염수 조건 고령토 퇴적물의 최소전단응력 τ_{bmin} 값은 0.147 N/m^2 로 산정되었다(Fig. 8 참조).

또한 본 연구에서 산정된 최소전단응력 값의 타당성 검증은 목적으로, 본 연구결과와 과거 타 연구결과와의 비교·검토가 이루어졌다. 고령토 퇴적물에 대한 과거 연구 사례는 많지 않은 상태로, 과거 연구 사례별 실험 조건 및 도출된 최소전단응력 값은 Table 3에 주어진다. Table 3에서 알 수 있듯이, 과거 Mehta and Partheniades(1975)에 의해 측정된 최소전단응력의 값은 염수 조건에서 0.15 N/m^2 로, 본 연구를 통하여 측정된 염수조건에서의 고령토 퇴적물에 대한 최소전단응력 값과 비교하여 매우 잘 일치함을 알 수 있는데 Mehta and Partheniades(1975)의 최소전단응력 값이 유효한

값으로 널리 인용되고 있는 점을 고려할 때에 본 연구를 통하여 측정된 최소전단응력 값은 매우 타당성 있는 값이라 할 수 있다. 또한 본 연구를 통하여 산정된 최소전단응력은 수돗물 조건에서 수행한 황규남과 양수현(2007)의 결과보다 작은 값을 가지는 것으로 나타났는데 이러한 결과는 앞서 4.4절에서 논의된 바와 같이 염도 존재에 따른 결과임을 감안할 때 매우 타당한 결과라 할 수 있다.

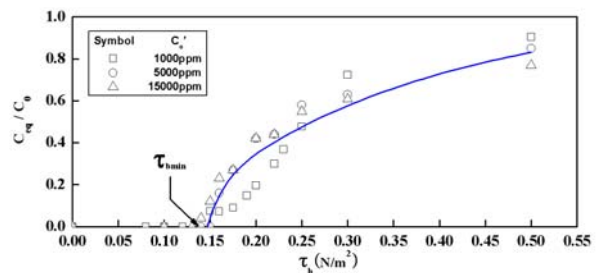


Fig. 8. Variation of C/C_0 with Bed Shear Stress under Salt Water

Table 3. Comparison of Experiment Conditions and τ_{bmin}

Researcher	Sediments	Fluid	τ_{bmin} (N/m^2)
Mehta & Partheniades (1975)	Kaolinite	distill water	0.180
		salt water	0.150
	50% Kaolinite & 50% Bay mud	salt water	0.119
	San Francisco Bay mud	salt water	0.096
황규남과 양수현(2007)	Kaolinite	tap water	0.175
This Study	Kaolinite	salt water	0.147

4.6 평형농도(C_{eq}) 산정식의 결정 및 검토

앞서 4.2절에서 확인된 바와 같이, 바닥전단응력 τ_b 가 최소전단응력 τ_{bmin} 보다 큰 경우에 수층 부유사 농도 C 는 명백히 평형농도 C_{eq} 에 도달하게 되고, 바닥전단응력이 커질수록 최소전단응력 또한 증가한다. 이러한 결과는 Mehta and Partheniades(1975), 황규남과 양수현(2007)의 관측결과와 동일한 결과인데, 그들은 이러한 결과에 근거하여 바닥전단응력의 함수로 주어지는 다음과 같은 평형농도 산정식을 제시하였다.

$$C_{eq}^* = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{y_n} e^{-w^2/2} dw \quad (1)$$

$$y_a = \frac{1}{\sigma_1} \log[(\tau_b^* - 1) / (\tau_b^* - 1)_{50}] \quad (2)$$

여기서 C_{eq}^* 와 τ_b^* 는 각각 상대평형농도와 상대바닥전단 응력을 나타내는데, 그 각각은 $C_{eq}^* = C_{eq} / C_0$, $\tau_b^* = \tau_b / \tau_{bmin}$ 으로 정의된다. 또한, σ_1 은 표준편차이고, ω 는 가상변수이며, $(\tau_b^* - 1)_{50}$ 은 기하평균값으로 C_{eq}^* 가 50 %일 때의 $(\tau_b^* - 1)$ 의 값을 나타낸다.

본 연구에서는 염수 조건에서의 고령토 퇴적물에 대한 퇴적실험 결과로부터 우선적으로 $(\tau_b^* - 1)$ 과 C_{eq}^* 의 상관관계를 분석하여 Eq. (2)의 타당성을 조사하였다. 각 실험별 바닥전단응력 값들에 고령토 퇴적물의 최소전단응력 값을 적용하여 각각의 $(\tau_b^* - 1)$ 값을 산정하고, 각각에 대응하는 C_{eq}^* 값을 취하여, $(\tau_b^* - 1)$ vs. C_{eq}^* 데이터가 도출되었으며, 그 결과는 최적접합곡선과 함께 누적로그-정규분포 좌표 상에 도식되어 Fig. 9에 주어진다.

누적로그-정규분포 함수는 누적로그-정규분포 좌표 상에서 직선으로 나타나는데, Fig. 9는 이러한 특성을 잘 나타내고 있다. 즉, C_{eq}^* 가 $(\tau_b^* - 1)$ 의 함수이며, 초기 농도의 크기에 무관하게 누적로그-정규분포 함수에 의해 잘 표현될 수 있음을 보여준다. 결론적으로, Fig. 9는 Mehta and Partheniades(1975)에 의해 제시된 Eq. (1)이 매우 타당성 있는 상대평형농도 산정식임을 입증하는 결과이다.

한편, Fig. 9에 주어진 측정 데이터에 Eq. (1)의 누적로그-정규분포 함수를 최소자승 접합법으로 접합시켜 매개변수 σ_1 과 $(\tau_b^* - 1)_{50}$ 이 각각 0.74와 0.65로 산정되었으며, 산정된 두 매개변수 σ_1 과 $(\tau_b^* - 1)_{50}$ 에 대한 타당성 검증을 위하여 σ_1 과 $(\tau_b^* - 1)_{50}$ 에 대한 과거 타 연구결과와의 비교·검토가 수행되었다. 과거 Mehta and

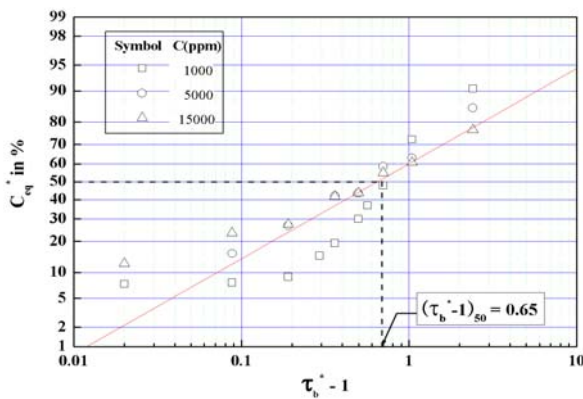


Fig. 9. Variation of C_{eq}^* with $\tau_b^* - 1$ under Salt Water

Partheniades(1975)는 다양한 퇴적물에 대하여 σ_1 과 $(\tau_b^* - 1)_{50}$ 을 산정하였는데, 그들은 $(\tau_b^* - 1)_{50}$ 은 최소전단 응력 τ_{bmin} 의 함수로 주어지는 다음과 같은 Eq. (3)을 제시하였다.

$$(\tau_b^* - 1)_{50} = 4 \exp(-1.27 \tau_{bmin}) \quad (3)$$

본 연구에서 산정된 $(\tau_b^* - 1)_{50}$ 은 Mehta and Partheniades(1975)의 결과들과 함께 Fig. 10에 주어지는데, 본 연구에서 산정된 $(\tau_b^* - 1)_{50}$ 이 Eq. (3)과 잘 일치함을 알 수 있다. 이는 Eq. (3)이 매우 타당성이 있음을 입증하는 결과이며, 또한 간접적으로는 본 연구에서 산정된 τ_{bmin} 과 $(\tau_b^* - 1)_{50}$ 이 타당함을 보여주는 결과라 할 수 있다.

또한, Mehta and Partheniades(1975)는 퇴적물 및 퇴적수의 조건에 상관없이 σ_1 이 항상 일정한 값을 갖는다고 주장하여 그 값으로 0.49를 제시하였으나, 그 이유에 대한 설명은 전혀 제시된 바 없으며, 앞서 평형농도 산정시에 요구되는 2개의 매개변수 중 하나인 $(\tau_b^* - 1)_{50}$ 은 τ_{bmin} 의 함수로써 퇴적물과 퇴적수에 따라 크게 변화할 수 있음이 확인되었다. 따라서 이러한 점을 고려할 때, 매개변수 σ_1 이 항상 일정한 값을 갖지 않을 가능성도 있다고 여겨지며, 퇴적물 및 퇴적수의 조건에 따라 크게 변화하는 것이 타당할 것으로 추정된다.

4.7 퇴적물 공식의 산정 및 결과의 검토

Mehta and Partheniades(1975)는 궁극적 퇴사량 $(C_0 - C_{eq})$ 에 대한 임의의 시간 t 에서의 퇴사량 $(C_0 - C)$ 의 비율로 정의되는 상대퇴사량 C^* 를 도입하여 다음과 같은 퇴사량 산정식을 제시하였다.

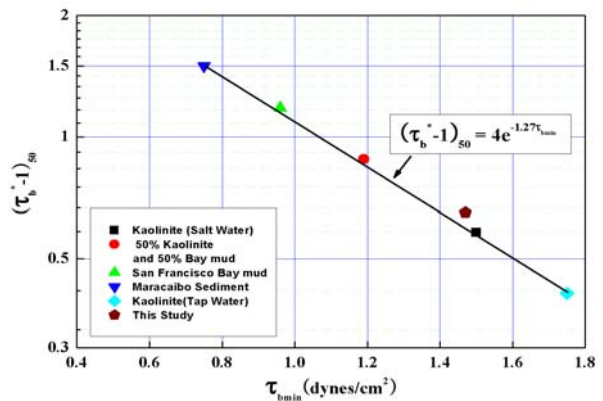


Fig. 10. Variation of $(\tau_b^* - 1)_{50}$ with τ_{bmin}

$$C^* = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^T e^{-\omega^2/2} d\omega \quad (4)$$

$$T = \frac{1}{\sigma_2} \log[t/t_{50}] \quad (5)$$

여기서 σ_2 는 표준편차이고, ω 는 가상변수이며, t_{50} 은 기하평균으로 상대퇴사량 C^* 가 50%일 때의 시간 t 를 나타낸다. 한편, Eq. (4)를 시간 t 로 적분하면 다음의 퇴적률 공식이 도출된다.

$$q = \frac{dC^*}{dt} = \frac{0.434}{\sqrt{2\pi}\sigma_2} e^{-T^2/2} \frac{1}{t} \quad (6)$$

따라서 두 매개변수 σ_2 와 t_{50} 의 값이 주어지면, Eq. (4)로부터 임의 시간 t 에서의 수층 부유사 농도 값이 산정될 수 있고, 또한 Eq. (6)으로부터 임의시간 t 에서의 퇴적률이 산정될 수 있다.

우선, 각 실험별로 t vs. C^* 데이터가 도출되었는데, 1000 ppm 조건에서의 대표적인 결과가 Fig. 11에 주어진다. 그림으로부터 누적로그-정규분포 좌표 상에서 상대퇴사량 C^* 의 측정값들이 시간이 증가함에 따라 선형적으로 증가함을 명백히 알 수 있는데, t 와 C^* 사이의 이러한 선형적 관계는 모든 실험에 대해 유효한 것으로 나타났다. 따라서, Eq. (4)의 퇴사량 공식이 누적로그-정규분포 함수임을 고려할 때에, 이러한 관측결과들은 Eq. (4)와 Eq. (6)이 매우 타당성이 있음을 의미하며, 또한 간접적으로는 본 연구에서 수행된 퇴적실험 방법 및 실험결과 또한 타당함을 나타낸다.

한편, Eq. (4) 혹은 Eq. (6)을 적용하기 위해서는 두 매개변수 σ_2 와 t_{50} 값들이 필수적으로 요구되므로, 본 연구에서는 각 실험별로 각각의 t vs. C^* 측정 데이터에

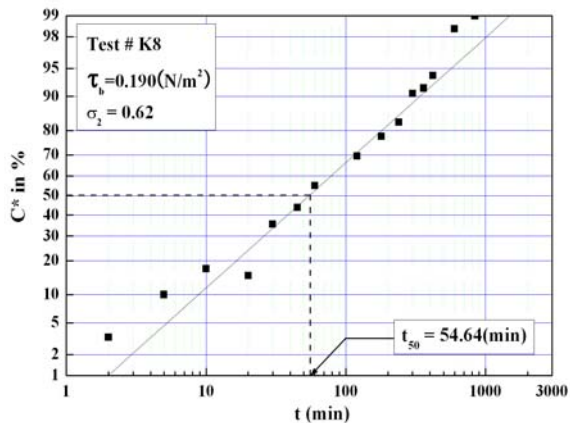


Fig. 11. Variation of C^* with t for Test #K8

Eq. (4)를 최소자승 접합법으로 접합시켜 두 매개변수 σ_2 와 t_{50} 값들을 산정하고, 매개변수들에 대한 산정식을 도출하고자 하였다. 우선, 매개변수 t_{50} 과 바닥전단응력 사이의 상관관계를 파악하기 위하여, 각 실험별로 τ_b^* vs. $\log t_{50}$ 데이터들이 도출되었으며, 수돗물 조건에서 실험을 한 황규남과 양수현(2007)의 결과와 함께 Fig. 12에 도식된다.

Fig. 12는 τ_b^* 와 $\log t_{50}$ 이 명백히 선형적 상관관계가 있음을 보여주는데 퇴적수로 수돗물과 염수를 사용한 두 실험에서 공통적으로 $\tau_b^*=1$ 근처를 기준으로 $\log t_{50}$ 의 변화 양상은 명백히 구분됨을 알 수 있다. $\tau_b^*<1$ 구간에서는 τ_b^* 가 증가함에 따라 $\log t_{50}$ 가 선형적으로 증가하고, $\tau_b^*>1$ 구간에서는 역으로 $\log t_{50}$ 가 감소하는 경향이 있음을 보여준다. 따라서 이러한 결과에 근거하여, $\tau_b^*=1$ 을 기준으로 각 구간별로 최적접합곡선이 산정되었으며, 그 결과가 Eq. (7)에 주어진다.

$$\log t_{50} = \begin{cases} 0.55\tau_b^* + 1.33 & \tau_b^* \leq 1 \\ -0.52\tau_b^* + 2.40 & \tau_b^* > 1 \end{cases} \quad (7)$$

또한, 매개변수 σ_2 에 대한 분석 또한 동일한 방법으로 수행되었다. 각 실험별로 τ_b^* vs. σ_2 데이터들이 도출되었으며, 그 결과는 Fig. 13에 도식된다. Fig. 13은 수돗물 조건과 염수 조건에서의 고령토 퇴적물의 τ_b^* 에 따른 σ_2 의 변화도인데, 그림으로부터 σ_2 는 $\log t_{50}$ 의 경우와는 비교적 다른 양상을 보임을 알 수 있다. σ_2 는 $\log t_{50}$ 의 경우와 마찬가지로 $\tau_b^*=1$ 을 기준으로 뚜렷하게 분리되기는 하나, τ_b^* 와 무관하게 일정한 상수값과 직선의 형태를 갖는다. 각 구간별로 $\tau_b^*=1$ 을 기준으로 각 구간별로 최적접합곡선이 산정되었으며, 그 결과가 Eq. (8)에 주어진다.

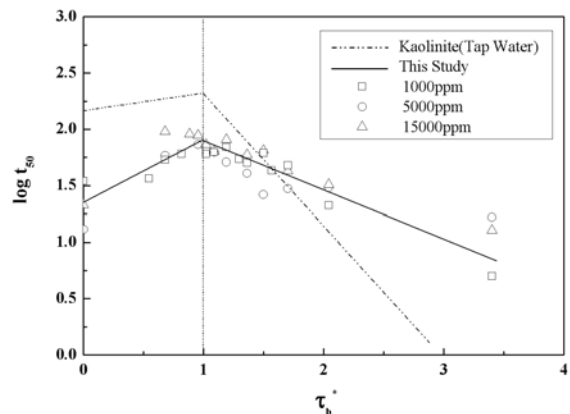


Fig. 12. Variation of $\log t_{50}$ with τ_b^* of Kaolinite

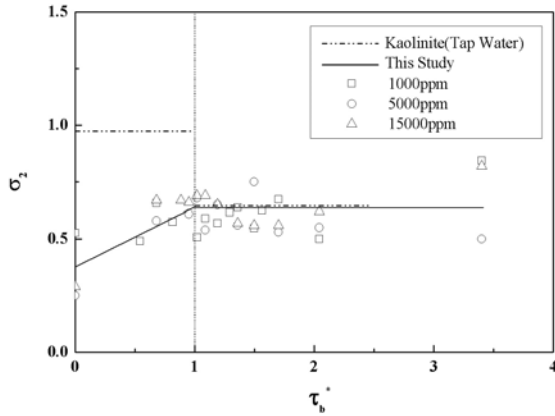


Fig . 13. Variation of σ_2 with τ_b^* of Kaolinite

$$\sigma_2 = \begin{cases} 0.24\tau_b^* + 0.38 & \tau_b^* \leq 1 \\ 0.64 & \tau_b^* > 1 \end{cases} \quad (8)$$

앞서 Eqs. (7)~(8)에 제시된 두 매개변수 σ_2 와 $\log t_{50}$ 값은 τ_b^* 에 의해 뚜렷하게 변화함을 알 수 있으며, σ_2 와 $\log t_{50}$ 은 τ_b^* 의 함수로 나타낼 수 있다. Mehta and Partheniades(1975) 또한 다양한 퇴적물과 퇴적수에 대한 퇴적실험을 수행하고 각각에 대한 σ_2 와 $\log t_{50}$ 값을 산정한 후에 그 변화 양상에 대한 분석을 수행한 바 있다. 그러나, 두 매개변수 σ_2 와 $\log t_{50}$ 값의 큰 변동성으로 인하여, 그들 또한 이들 매개변수들에 대한 일반적 산정식은 도출하지 못하였으며, 단지 매개변수 σ_2 와 t_{50} 이 바닥전단응력 τ_b , 수심 d 및 초기부유사 농도 C_0 의 함수가 된다는 결론을 제시하였다.

5. 결 론

본 연구에서는 초기 농도에 따른 퇴적특성의 변화를 알아보기 위하여 각기 다른 3가지 초기농도 조건(1000, 5000, 15000 ppm)에서 주어진 바닥전단응력의 변화에 따라 각 초기농도별 수층 부유사의 퇴적률을 산정하였으며, 퇴적률과 바닥전단응력 사이의 관계로부터 염수 조건에서의 고령토 퇴적물의 최소전단응력 산정 및 퇴적특성에 미치는 초기농도의 영향에 대한 정성적 분석이 수행되었다.

본 퇴적실험 결과에 따르면, 일정 바닥전단응력 값, 즉 최소전단응력보다 큰 바닥전단응력 하에서 수층부유사 농도는 “평형농도”에 도달하게 되고, 최소전단응력보다 작은 바닥전단응력 하에서는 모든 수층 부유사는 궁극적으로 퇴적되는 현상이 관측되었다. 이는 과거 Mehta and Partheniades(1975), Partheniades *et al.* (1966) 및 황규남과 양수현(2007) 등의 관측과 일치하는 결과로써, 평형농도의 발생여부를 나타내는 최소전단응

력이 명백히 존재함을 보여주었다. 본 연구를 통하여 염수 조건에서의 고령토 퇴적물에 대한 최소전단응력은 0.147 N/m^2 로 산정되었으며, 최소전단응력에 대한 본 연구 결과는 과거 환형수조를 이용하여 염수조건에서 실험을 수행한 Mehta and Partheniades(1975)의 결과와 비교하여 매우 잘 일치하는 것으로 나타났다.

퇴적특성에 미치는 초기농도의 영향과 관련하여 평형농도의 정량적 크기는 다소 차이를 보이나 평형농도가 존재하며, 바닥전단응력이 증가할수록 평형농도 또한 증가함이 확인되었으며, 이러한 특성을 고려할 때 평형농도는 초기농도의 크기와는 무관함이 입증되었다. 또한 퇴적특성에 미치는 염도의 영향과 관련하여서는 과거 수돗물 조건하에서 고령토를 이용하여 퇴적실험을 한 황규남과 양수현(2007)의 결과와 비교하여, 동일 조건하에서 염도 존재시에 수층 부유사의 퇴적률은 증가하고, 평형농도에 이르는 시간은 빨라지며, 최소전단응력 값은 상대적으로 작아짐을 알 수 있었으며, 이러한 결과는 염도 존재시에 향상된 입자간의 응집물로 인하여 플록의 강도와 비중이 증가된다는 점을 고려할 때 타당한 결과라고 할 수 있다.

앞서 설명한 바와 같이 σ_1 과 $(\tau_b^* - 1)_{50}$ 은 점착성 퇴적물 퇴적특성의 주요 매개변수들로 본 연구에서 산정된 퇴적특성에 미치는 매개변수 σ_1 과 $(\tau_b^* - 1)_{50}$ 은 각각 0.74와 0.65인 것으로 나타났으며, 산정된 매개변수 σ_1 과 $(\tau_b^* - 1)_{50}$ 값에 대해 과거 타 연구결과와 비교·검토가 수행되었다. 그 결과 최소전단응력에 따른 $(\tau_b^* - 1)_{50}$ 의 변화는 과거 Mehta and Partheniades(1975)의 결과와 잘 일치하는 것으로 나타났으나, σ_1 값은 그들의 결과와 상당한 차이가 있는 것으로 나타났다. 또한 상대퇴적량 (C^*) 산정을 위한 매개변수 σ_2 와 $\log t_{50}$ 의 값은 $\tau_b^* = 1$ 을 기준으로 명백히 변화됨이 확인되었으나, 매개변수 σ_2 와 $\log t_{50}$ 은 값의 변화의 다양성으로 인해 산정식의 타당성 검증은 향후 연구과제로 남겨진 상태이다.

본 연구 결과는 과거 타 연구결과와의 비교·분석을 통하여 그 타당성이 검증되었으며, 본 퇴적특성 연구의 타당성을 고려할 때, 향후 자연 갯벌 점착성 퇴적물에 대한 퇴적특성을 정량적으로 평가할 수 있는 기초가 확립되었다고 할 수 있다. 또한 본 연구에서 사용된 퇴적실험 방법과 평가방법은 향후 항만개발시에 발생 가능한 항로매몰의 예측을 위한 수치모형 실험시에 입력 자료로 사용될 수 있을 뿐만 아니라, 수층 부유사 농도의 연직구조 변동 예측, 수질 및 퇴적물오염 저감을 위한 대책방안 수립 등 다양한 목적으로 크게 활용될 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구의 일부는 전북대학교 부설 공학연구원 공업기술연구센터의 지원으로 수행되었기에 감사드립니다.

참고 문헌

- 김재중 (1989). 점성토의 침식 및 퇴적에 관한 실험적 연구. 박사학위논문, 서울대학교.
- 박상용 (2004). 난류 영향에 의한 미세 점착성 퇴적물의 침강 및 퇴적특성에 관한 연구. 석사학위논문, 전북대학교
- 황규남, 소상돈 (2002). “환형수조를 이용한 미세-점착성 퇴적물의 침식특성 조사.” **한국수자원학회 2002년 학술발표회 논문집(II)**, 한국수자원학회, pp. 1075-1080.
- 황규남, 소상돈, 김태민 (2005). “미세-점착성 퇴적물의 침식을 안정을 위한 실험적 연구.” **한국해안·해양 공학회논문집**, 한국해안·해양공학회, 제17권, 제2호 pp. 110-128.
- 황규남, 양수현 (2007). “고령토 퇴적물의 퇴적특성에 대한 실험적 연구.” **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제27권, 제6B호, pp. 679-687.
- Mehta, A.J. and Partheniades, E. (1975). “An investigation of the depositional properties of flocculated fine sediments.” *Journal of Hydraulic Research*, No. 4, pp. 361-381.
- Partheniades, E., Kennedy, J.F., Etter, R.J. and Hoyer, R.P. (1966). *Investigations of the depositional behavior of fine cohesive sediments in an annular rotating channel*. Rep. No. 96, Hydrodynamics Lab., M. I. T., Cambridge.
- (논문번호:08-28/접수:2008.02.29/심사완료:2008.06.25)