

마산항 점착성 퇴적물의 퇴적특성에 대한 실험적 연구 An Experimental Study on Depositional Properties of Cohesive Sediments in Masan Port

양수현* · 김남훈** · 황규남*
Su-Hyun Yang*, Nam Hun Kim** and Kyu-Nam Hwang*

요지 : 본 연구에서는 자연시료에 대한 퇴적 매개변수를 정량적으로 산정하기 위하여, 환형수조를 이용한 퇴적실험이 수행되었다. 퇴적실험을 위해 마산항이 대표 해역으로 선정되어 시료가 채취되었으며, 퇴적실험은 초기농도가 동일한 조건에서 바닥전단응력의 크기만을 변화시키면서 총 18회의 실험이 수행되었다. 퇴적실험 결과, 마산항 갯벌 점착성 퇴적물의 최소전단응력 τ_{bmin} 과 퇴적물 매개변수 σ_1 및 $(\tau_b^* - 1)_{50}$ 은 각각 0.10 N/m², 0.54, 0.87로 산정되었으며, 과거 타 연구결과와의 비교·검토를 통하여 본 실험에서 도출된 결과의 타당성이 입증되었다.

핵심용어 : 점착성 퇴적물, 최소전단응력, 평형농도, 퇴적률, 마산항

Abstract : In this study, a series of deposition tests have been performed using an annular flume in order to estimate depositional parameter of natural sediments. The sediment of Masan Port has been collected for deposition tests, and total 18 deposition tests have been carried out on different bed shear stress respectively but with the same initial concentration. As the results, the minimum bed shear stress τ_{bmin} , standard deviation σ_1 and time scale parameter $(\tau_b^* - 1)_{50}$ are found to be 0.10 N/m², 0.54 and 0.87 respectively. Through comparing with results from previous studies for other sediments, the results of this study are shown to be good enough to verify.

Keywords : cohesive sediments, minimum shear stress, equilibrium concentration, deposition rate, Masan Port

1. 서 론

우리나라의 남해안에 위치하고 있는 마산항은 동남아시아권의 중심 교역항 및 부산항의 보조항 등으로써의 역할을 담당하는 국제항으로 자리잡아 왔다. 그러나 부산 신항, 광양항 등의 대형 항만과 인접해 있고 상대적으로 부두시설이 노후화 되어 있어 마산항의 항만 경쟁력이 점차 감소하고 있는 실정이며, 더욱이 자유수출지역의 쇠퇴 및 물동량 감소 등으로 인하여 부두 생산성이 현실적으로 낮은 상태이다(Lee, 2011). 마산항의 활성화를 위하여 기반시설의 확대 및 수심 확보를 위한 준설의 필요성이 제기되고 있는데, 이러한 개발로 인한 해역의 해수유동 변화 및 이로 인해 수반되는 해저지형, 해양생태계 등의 변화는 필연적이라고 하겠다. 특히, 반 폐쇄성(semi-closed) 해역인 진해만의 동북쪽에 위치하고 있는 마산항은 항만 입구부가 병목형태로 좁고 길게 형성되어 있어 조류의 유출입이 원활하지 않으며, 더욱이 해안선의 굴곡이 심하고 수심이 비교적 얕아서 대형선박의 접안이 어렵다는 단점을 갖는다. 또한, 마산항과 연결된 하천의 길이가 매우 짧

고 바람과 해류의 영향이 적어서 외해와의 해수교환율이 매우 작아 해역의 자정작용이 매우 어려운 입지조건을 가지고 있다. 이러한 반 폐쇄성 해역은 퇴적의 가능성이 매우 높은 해역으로써, 마산항 활성화를 위한 개발이 수행될 경우 퇴적 현상은 더욱 가속화될 수 있다. 마산항의 퇴적물 과다퇴적으로 인한 항로매몰 현상 및 환경오염 등과 같은 문제해결을 위해서는 마산항 퇴적물의 퇴적특성에 대한 정량적 해석이 가장 기초적이고도 필수적인 사항이라 하겠다.

한편, 점착성 퇴적물의 퇴적특성에 대한 연구는 국내외에서 많은 연구자들에 의해 다양한 방법으로 관측·분석되어져 왔다. 해외의 경우, Krone(1962), Rosillon and Volkenborn(1964), Partheniades(1965), Mehta and Partheniades(1975) 등에 의해 고령토 및 자연퇴적물 시료를 이용한 점착성 퇴적물의 퇴적 특성 연구가 활발하게 진행되어져 왔다. 그러나 국내의 경우에는 관련 연구가 매우 미미한 실정인데, Kim(1989)은 직선수조를 이용한 퇴적실험을 수행하였으나 응집토사의 분리가 이루어져 점착성 퇴적물 퇴적특성의 정량적 산정에 실패하였으며, Park(2004)은 환형수조를 이용하여 응집토사입자의 분

*전북대학교 토목공학과, 방재연구센터(Corresponding author: Kyu-Nam Hwang, Civil Eng., Chonbuk National Univ., Baekjedae-ro 567, Duckjin-gu, Jeonju, 54896, Korea, Tel: +82-63-270-2345, Fax: +82-63-270-2421, khwang@jbnu.ac.kr)

**대우건설 토목사업본부(Daewoo Eng.& Construction)

리 현상을 배제하였으나 실험방법의 부적절성으로 인하여 타당성 있는 퇴적특성 값을 도출하지는 못하였다. 이후, Hwang and Yang(2007), Hwang et al.(2008)은 고령토 퇴적물을 이용한 퇴적실험을 수행하였으며, 퇴적수의 염도에 따른 퇴적특성의 변화를 정량적으로 산정하여 제시하였다. Jung et al.(2012)은 국내 최초로 자연시료를 이용한 퇴적실험을 수행하고 퇴적특성을 정량적으로 산정·제시하였으나, 국내 퇴적실험 자료의 부족으로 인하여 산정된 매개변수 값의 타당성 검증은 수행되지 못하였다.

이에 본 연구에서는 마산항 점착성 퇴적물의 퇴적특성을 정량적으로 산정하고 타당성 있는 매개변수 값을 도출하기 위하여, 주어진 바닥전단응력 하에서 수층 부유사 농도변화의 시간적 변화가 측정되고 이로부터 수층 부유사의 퇴적률이 산정되었다. 퇴적물과 흐름에 의한 바닥전단응력간의 관계로부터 마산항 점착성 부유토사의 최소전단응력 즉, 퇴적한계 전단응력이 정량적으로 산정되고 평형농도 산정식과 퇴적물 공식이 도출되었으며, 마지막으로 과거 타 연구결과와의 비교 검토를 통하여 본 연구결과와 타당성이 검증되었다.

2. 현장 표본시료 채취

마산항 점착성 퇴적물의 물리·화학적 특성 및 퇴적특성 분석을 위하여 2005년 11월 3일에 마산항 내의 점착성 퇴적물의 채취가 용이한 1개 대표정점에서 현장 표본시료가 채취되었다. 현장 해수조건을 반영하기 위하여 동일 정점에서 해수가 채취되었으며, 채취된 해수는 퇴적실험의 전 과정에서 사용되었다. 마산항 점착성 퇴적물의 표본시료 채취위치의 경위도 좌표와 채취 당시의 수온, 염도 및 부유사농도는 Table 1에 제시된다.

3. 마산항 점착성 퇴적물의 물리·화학적 특성

점착성 퇴적물의 퇴적특성은 사질성 퇴적물과는 달리 입자간의 응집현상에 의해 크게 영향을 받으며, 입자간의 응집을 지배하는 주요 인자인 점착력은 입경분포, 광물질 구성, 유기물 함량 등으로 묘사되는 퇴적물 자체의 물리·화학적 기본 특성에 따라 크게 변화한다(Mehta, 1986). 이에 본 연구에서는 마산항 점착성 퇴적물의 물리·화학적 특성 조사를 위하여 입경분포, 광물질 구성, 유기물 함량 및 CEC(Cation Exchange Capacity)의 4가지 항목에 대한 조사분석이 수행되었다.

Table 1. Basic information of sampling site and sea water used as an eroding fluid

Coordinate	Depth (m)	Temperature (°C)	Salinity (‰)	Concentration (mg/L)
35°10' 49.5" N 128°34' 13.7" E	11.0	12.8	32.0	7.6

3.1 입경분포

마산항 점착성 퇴적물의 입경분포는 체분석과 비중계법을 병행하여 분석되었다. 우선 현장에서 채취된 퇴적물 표본시료는 No. 200체($\Phi = 75 \mu\text{m}$)를 기준으로 wet-sieving 방법으로 분리되었으며, No. 200체를 통과한 시료에 대해서는 비중계 분석이 수행되었고, 체에 남은 시료에 대해서는 체 분석이 수행되었다. 한편, 비중계 실험은 ASTM(1987)이 제시한 방법에 따라 수행되었으며, 입경분포 분석에 대한 자세한 사항은 Hwang et al.(2002)에 주어진다. 본 연구에서 도출된 입경분포 측정 결과는 Fig. 1에 주어지며, 마산항에서 채취된 퇴적물 표본시료의 평균입경은 $14.4 \mu\text{m}$ 인 것으로 나타났다.

3.2 광물질 구성성분

마산항 점착성 퇴적물의 광물질 구성 성분 분석은 전북대학교 공동시험소가 보유하고 있는 회절분석기(X-ray diffraction)를 이용하여 분석이 수행되었다. 본 연구에서는 광물질 구성성분의 정량적인 분석은 수행되지 않고 단지 정성적인 분석만이 수행되었으며, 그 결과는 Table 2에 주어진다. 표에 주어진 바와 같이, 마산항 점착성 퇴적물의 광물질 구성 성분은 내림차순으로 석영, 일라이트, 미사장석, 고령토 등이 지배적인 성분인 것으로 나타났다.

3.3 유기물 함량

마산항 점착성 퇴적물의 유기물 함량은 해양환경공정시험방법(NFRDI, 1997)에 따른 강열감량법에 의해 분석되었다.

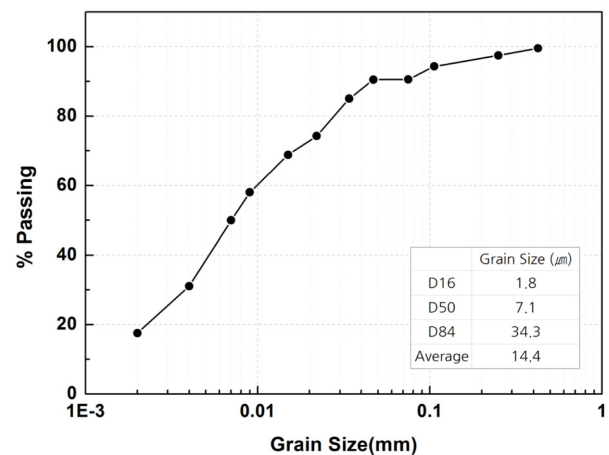


Fig. 1. Grain size distribution of cohesive sediment in Masan Prot.

Table 2. Mineralogical Composition of cohesive sediment in Masan Prot

Rank	Components of mineral materials
1	Quartz (석영)
2	Illite (일라이트)
3	Albite (미사장석)
4	Kaolinite (고령토)

우선, 채취된 퇴적물 표본시료들은 동결 건조 후에 곱게 분마 되었으며, 곱게 분마된 시료 중 일정량(약 5 g)을 취하여 전기로에 넣고 550°C에서 약 2시간 동안 가열하였다. 유기물 함량의 퍼센티지는 가열전의 시료무게와 가열후의 시료무게의 차이에 의해서 산정되었으며, 실험결과 마산항 점착성 퇴적물의 유기물 함량은 13%인 것으로 나타났다.

3.4 양이온 교환능력

점토입자의 표면은 동형치환, 수산기이온의 해리, 입자단부에서의 결합의 파괴, 유기물질의 존재 등으로 인해 음전하로 대전되어 있는데(Mitchell, 1993), 양이온교환능력은 이 음전하량에 의해 주어진다. 현재, 점토입자 표면의 이 음전하량을 직접 측정할 수 있는 방법은 없으며, 어느 특정 양이온으로 완전 포화시켜 특정 양이온을 측정하거나 포화된 양이온을 다시 다른 양이온으로 교환 침출시켜 침출된 특정 양이온을 측정함으로써 교환용량을 산출하는 간접적 음전하량 측정방법이 제시되고 있다. 양이온교환능력 측정을 위해 제시되고 있는 많은 방법들 중에 일반적으로 가장 많이 쓰이는 방법으로는 pH 7에서 측정되는 초산암모늄(NH_4OAc , ammonium acetate)법, pH 8.2에서 측정되는 초산나트륨(NaOAc)법, pH 5.1에서 측정되는 염화나트륨(sodium chloride) 치환침출법 등을 들 수 있다. 본 연구에서 양이온교환능력은 강원대학교 내 산업광물은행에 의뢰하여 암모늄 아세테이트법을 이용하여 측정되었다. 측정된 양이온교환능력은 35.8 meq/100 g인 것으로 나타났는데, 양이온 교환능력에 영향을 미치는 요인이 매우 다양하기 때문에 그 값을 정확하게 측정하는 것은 매우 어려우며, 동일한 시험방법을 적용해도 각 실험마다 큰 차이를 보이기도 한다(Moon, 1996).

4. 퇴적실험 방법 및 조건

본 연구에서 퇴적실험은 전북대 환형수조를 이용하여 수행되었으며, 전체적인 실험 과정은 Mehta and Partheniades(1975)가

채택한 방법에 따라 진행되었다. 퇴적실험 수행에 이용된 환형수조의 특성 및 퇴적실험 방법에 대한 보다 자세한 설명은 Hwang and Yang(2007) 및 Hwang et al.(2005)에 주어진다.

본 연구에서 퇴적실험은 마산항에서 채취된 자연 점착성 퇴적물 시료를 이용하여 바닥전단응력을 변화시켜가며 총 18회 수행되었으며, 퇴적물이 채취된 정점과 동일정점에서 채취된 해수를 이용하여 탁수가 제작되어 실험 전 과정에 사용되었다. 퇴적실험시간은 각 실험별 미리 설정된 바닥전단응력 하에서 최소 13.3시간부터 최대 48시간까지 변화하였으며, 바닥전단응력이 작아질수록 비교적 장시간이 소요되었다. 모든 퇴적실험에서 수층의 깊이와 탁수의 농도는 각각 10 cm와 1000 ppm으로 동일하였으며, 각 실험별 자세한 퇴적실험 조건은 Table 3에 주어진다.

5. 퇴적실험 결과

5.1 수층 부유사의 퇴적거동에 미치는 바닥전단응력의 영향

퇴적거동에 미치는 바닥전단응력의 영향을 분석하기 위하여, 본 연구에서는 각 실험별로 바닥전단응력의 크기를 변화시키면서 퇴적실험이 수행되었다. 탁수농도 1000 ppm 조건에서 수행된 총 18회의 퇴적실험에 대하여 각 바닥전단응력 별 상대농도의 변화도가 작성되어 Fig. 2에 제시된다. 퇴적거동에 미치는 바닥전단응력의 영향과 관련하여, Fig. 2는 중요한 2가지의 결과를 제시하고 있는데, 첫째는 일정 바닥전단응력 값, 즉 최소전단응력보다 큰 바닥전단응력 하에서 농도 C 는 명백히 평형농도 C_{eq} 에 도달하게 되고, 최소전단응력보다 작은 바닥전단응력 하에서는 모든 수층부유사는 궁극적으로 퇴적하게 된다는 것이다. 둘째는 바닥전단응력 τ_b 가 커질수록 C_{eq} 의 값이 커진다는 사실인데, Fig. 2에서 $\tau_b \geq 0.100 \text{ N/m}^2$ 인 경우에는 항상 C_{eq} 에 도달하고, τ_b 가 커질수록 C_{eq} 또한 커지는 것을 알 수 있다. 반면 $\tau_b \leq 0.080 \text{ N/m}^2$ 인 모든 경우에 C 는 C_{eq} 에 도달하지 못하고 계속적으로 감소하여 최종적으로 0, 즉 전부 퇴적됨을 알 수 있다. 이러한

Table 3. Experimental conditions

Test No.	Initial concentration (ppm)	Shear stress (N/m^2)	Temp. ($^{\circ}\text{C}$)	Exp. time (hr)	Test No.	Initial concentration (ppm)	Shear stress (N/m^2)	Temp. ($^{\circ}\text{C}$)	Exp. time (hr)
M1	1054	0.000	18-19	26.7	M10	1095	0.150	19-20	48.0
M2	1025	0.030	20-21	24.8	M11	1075	0.160	19-20	45.8
M3	1065	0.050	21-22	23.2	M12	1100	0.175	20-21	35.8
M4	1015	0.080	19-20	27.0	M13	1105	0.200	18-19	34.0
M5	1080	0.100	20-21	27.0	M14	1085	0.220	19-20	24.9
M6	1110	0.110	19-20	45.0	M15	1085	0.300	19-20	19.6
M7	1085	0.120	18-19	30.3	M16	1085	0.350	19-20	13.5
M8	1045	0.130	18-19	34.1	M17	960	0.400	20-21	27.8
M9	1060	0.140	18-19	48.0	M18	1045	0.500	22-23	13.3

결과로부터 Mehta and Partheniades(1975), Hwang and Yang(2007), Jung et al.(2012)이 주장한 바와 같이 최소전단 응력 τ_{bmin} 이 명백히 존재한다는 것을 알 수 있다.

5.2 최소전단응력(τ_{bmin})의 산정 및 검토

최소전단응력 τ_{bmin} 은 평형농도의 발생여부를 나타내는 지표이며, 또한 퇴적발생의 유무를 나타내는 바닥전단응력의 한계값으로써 주어진 τ_b 가 τ_{bmin} 보다 작은 경우에는 궁극적으로 모든 퇴적물이 퇴적되는 것으로 정의된다(Mehta and Partheniades, 1975). 따라서, τ_{bmin} 을 기준으로 가해진 τ_b 의 크기에 따라 퇴적특성이 다르게 될 것이므로, τ_{bmin} 의 정량적 산정은 매우 필수적 사항이라 하겠다.

본 연구에서 τ_{bmin} 값은 Mehta and Partheniades(1975), Hwang and Yang(2007), Jung et al.(2012)에 의해 제시된 방법에 따라 산정되었다. 우선, τ_b 별로 주어진 상대농도 변화도(Fig. 2 참조)로부터 C_{eq} 의 존재유무가 우선 파악되었으며, 이로부터 각 τ_b 별 상대평형농도 C_{eq}/C_o 의 값이 산정되었다. 각

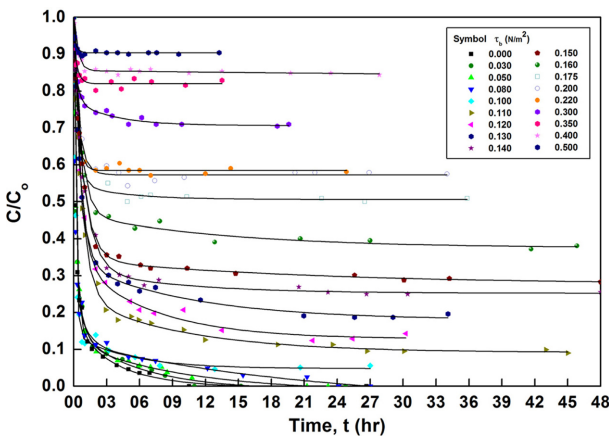


Fig. 2. Comparison of variation of C/C_o with bed shear stress.

τ_b 에 대한 C_{eq}/C_o 의 데이터로부터 최소자승접합법에 의해 접합곡선이 도출되었으며, 그 결과가 Fig. 3에 제시된다. Fig. 3에서, τ_b 의 크기를 나타내는 횡좌표와 교차하는 점에서의 τ_b 값이 최소전단응력 τ_{bmin} 로 정의되며, 본 연구로부터 산정된 마산항 점착성 퇴적물의 τ_{bmin} 은 0.100 N/m^2 인 것으로 나타났다.

한편, 본 연구로부터 산정된 마산항 점착성 퇴적물의 τ_{bmin} 값이 과거 타 연구결과와 실험조건들과 비교되어 Table 4에 요약·제시된다. Table 4를 살펴보면, 동일한 염수조건 임에도 불구하고 퇴적물이 채취된 지역에 따라 τ_{bmin} 값이 현저하게 변화하고 있음을 알 수 있다. 예를 들어, 본 연구에서 수행된 마산항 점착성 퇴적물의 τ_{bmin} 은 0.100 N/m^2 으로, 이는 브라질 Maracaibo 하구 퇴적물보다 약 25% 크고, 미국 San Francisco 만 퇴적물보다는 약 35% 크며, 광양만 점착성 퇴적물보다 약 10% 작은 값이다. 각 지역마다 τ_{bmin} 값이 정량적으로 차이를 보이는 것은 퇴적물 자체의 물리·화학적 특성의 지역적 차이에서 비롯된 것으로 추정되며, 이는 자연상태 점착성 퇴적물의 τ_{bmin} 값이 site-specific한 특성을 갖는다는 것을 의미한다.

5.3 평형농도 산정공식의 결정 및 검토

앞서 확인된 바와 같이, τ_b 가 τ_{bmin} 보다 큰 경우 C 는 명백

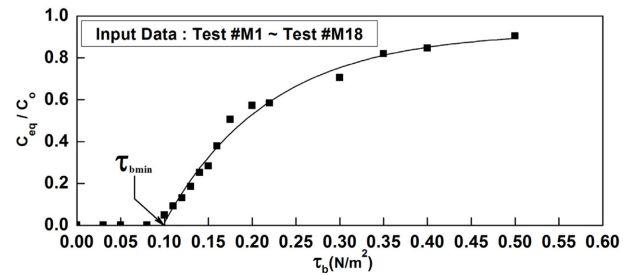


Fig. 3. Variation of C_{eq}/C_o with bed shear stress and minimum shear stress(τ_{bmin}).

Table 4. Comparison of experimental conditions and results in the previous studies

Researcher	Sediments	Fluid	(N/m^2)	Etc.
Rosillon & Volkenborn(1964)	Maracaibo Estuary mud	salt water	0.075	straight flume
Partheniades(1965)	San Francisco Bay mud	salt water	0.065	straight flume
Partheniades et al.(1966)	Kaolinite	distill water	0.040	annular flume
	Kaolinite	distill water	0.180	
		salt water	0.150	
Mehta & Partheniades (1975)	50% Kaolinite & 50% Bay mud	salt water	0.119	annular flume
	San Francisco Bay mud	salt water	0.096	
Hwang and Yang(2007)	Kaolinite	tap water	0.175	annular flume
Hwang et al.(2008)	Kaolinite	salt water	0.147	annular flume
Jung et al.(2012)	Kwangyang Bay mud	salt water	0.110	annular flume
This Study	Masan port	salt water	0.100	annular flume

히 C_{eq} 에 도달하게 되고, τ_b 가 커질수록 C_{eq} 는 증가한다. 이러한 결과는 Mehta and Partheniades(1975) 및 Hwang and Yang(2007), Jung et al.(2012) 등의 관측결과와 동일한 결과인데, Mehta and Partheniades(1975)는 이러한 결과에 근거하여 τ_b 의 함수로 주어지는 다음과 같은 평형농도 산정식을 제시하였다.

$$C_{eq}^* = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{y_a} e^{-\omega^2/2} d\omega \quad (1)$$

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

여기서 C_{eq}^* 와 τ_b^* 는 각각 상대평형농도와 상대바닥전단응력을 나타내며, 각각은 $C_{eq}^* = C_{eq}/C_0$, $\tau_b^* = \tau_b/\tau_{bmin}$ 으로 정의된다. 또한 σ_1 은 표준편차이고, ω 는 가상변수(dummy variable)이며, $(\tau_b^* - 1)_{50}$ 은 기하평균값(geometric mean)으로 C_{eq}^* 가 50%일 때의 $(\tau_b^* - 1)$ 값을 나타낸다. 각 매개변수들의 물리적 의미에 대한 보다 자세한 설명은 Mehta and Partheniades(1975)에 주어진다.

먼저, 마산항 점착성 퇴적물에 대한 퇴적실험 결과로부터 우선적으로 $(\tau_b^* - 1)$ 과 C_{eq}^* 의 상관관계를 분석하여 식 (1)과 식 (2)의 타당성을 조사하였다. 각 실험별 τ_b 값들에 마산항 점착성 퇴적물의 τ_{bmin} 값을 적용하여 각각의 $(\tau_b^* - 1)$ 값을 산정하고, 이 값에 대응하는 C_{eq}^* 값을 취하여 $(\tau_b^* - 1)$ vs. C_{eq}^* 데이터가 도출되었으며, 그 결과는 최소자승접합법에 의해 도출된 접합곡선과 함께 누적로그-정규분포 좌표상에 도식되어 Fig. 4에 주어진다.

누적 로그-정규분포 함수는 누적 로그-정규분포 좌표 상에서 직선으로 나타나는데, Fig. 4는 이러한 특성을 잘 나타내고 있음을 알 수 있다. 구체적으로, 이 결과는 C_{eq}^* 가 변형된 상대전단응력 $(\tau_b^* - 1)$ 의 함수이며, 누적 로그-정규분포 함수에 의해 잘 표현될 수 있음을 보여준다. 결론적으로, Fig. 4는 Mehta and Partheniades(1975)에 의해 제시된 식 (1)과 식 (2)가 매우 타당성 있는 C_{eq}^* 산정식이라는 것을 입증하는 결과이며, 또한 간접적으로는 본 연구에서 수행된 퇴적실

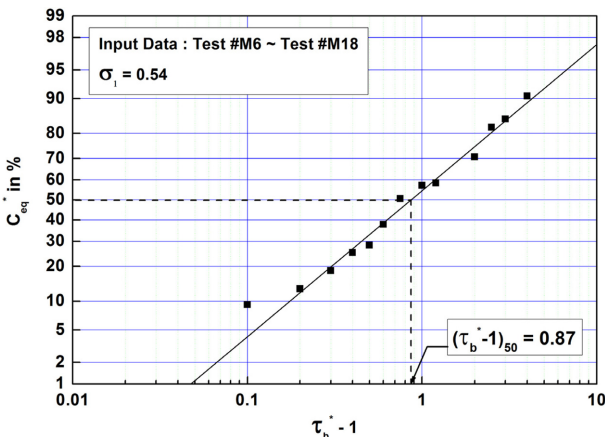


Fig. 4. Variation of C_{eq}^* with $(\tau_b^* - 1)$.

험 방법 및 실험결과가 타당함을 보여주는 결과라고 하겠다.

한편, Fig. 4에 주어진 접합곡선은 식 (1)과 식 (2)의 누적 로그-정규함수분포를 최소자승접합법으로 접합시켜 산정된 결과로써, 매개변수 σ_1 및 $(\tau_b^* - 1)_{50}$ 은 각각 0.54와 0.87로 산정되었다. 산정된 매개변수 값의 타당성 검증을 위하여, 과거 연구결과와의 비교검토가 수행되었는데, 과거 Mehta and Partheniades(1975)는 다양한 퇴적물에 대하여 σ_1 및 $(\tau_b^* - 1)_{50}$ 의 값을 산정한 바 있다. 그들은 $(\tau_b^* - 1)_{50}$ 에 대하여 τ_{bmin} 의 함수로 주어지는 다음의 식 (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. 5에 주어지는데, 본 연구에서 산정된 $(\tau_b^* - 1)_{50}$ 이 식 (3)과 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. 이는 식 (3)이 매우 타당성 있음을 입증하는 결과이며, 또한 간접적으로는 본 연구에서 산정된 τ_{bmin} 과 $(\tau_b^* - 1)_{50}$ 값이 타당함을 보여주는 결과라 할 수 있다.

한편, 과거 Mehta and Partheniades(1975)는 σ_1 값이 퇴적물 및 퇴적수의 조건에 상관없이 항상 일정한 값을 갖는다고 주장하여 σ_1 값으로 0.49를 제시한 바 있으나, 본 연구에서 도출된 σ_1 값은 Hwang and Yang(2007), Jung et al.(2012)에서 주장한 바와 같이 퇴적물 및 퇴적수의 조건에 따라 크게 변화할 수 있는 것으로 나타났다. 본 연구결과 및 Hwang and Yang(2007), Jung et al.(2012)의 연구결과를 고려할 때, 퇴적물 및 퇴적수의 조건에 따라 σ_1 값이 변화하는 것은 타당한 것으로 판단된다. 현재의 퇴적실험 결과로는 데이터 수의 부족으로 인하여 이러한 추정에 대한 검증이 불가능하므로, 이에 대한 검증은 다양한 자연상태 퇴적물 및 퇴적수 조건에서의 퇴적실험을 통하여 수행해야 할 것이며 이는 향후 연구과제로 남겨진다.

5.4 퇴적물 산정식의 결정 및 검토

Mehta and Partheniades(1975)는 궁극적 퇴사량($C_0 - C_{eq}$)

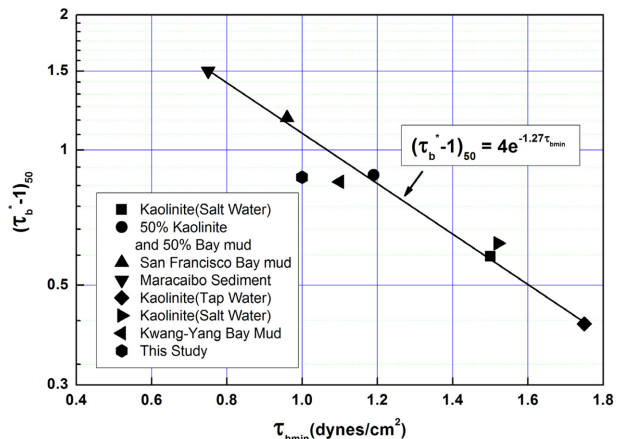


Fig. 5. Variation of $(\tau_b^* - 1)_{50}$ with τ_{bmin} .

에 대한 임의의 시간 t 에서의 퇴사량 $(C_0 - C)$ 의 비율로 정의되는 상대퇴사량 C^* 를 도입하여 다음과 같은 퇴사량 산정식을 제시하였다.

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

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

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

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

따라서 두 매개변수 σ_2 와 t_{50} 의 값이 주어지면, 식 (4)로부터 임의의 시간 t 에서의 수층 부유사농도 값이 산정될 수 있고, 또한 식 (6)으로부터 임의의 시간 t 에서의 퇴적률이 산정될 수 있다.

우선, 각 실험별 t vs. C^* 의 상관관계가 분석되었는데, 대표적인 예로써 Test #M8의 결과가 Fig. 6에 주어진다. Fig. 6에서, 누적로그-정규분포 좌표상에서 시간에 따른 C^* 의 변화는 선형적으로 증가하는 것으로 나타남을 알 수 있으며, 이러한 관계는 모든 실험에 대해 유효한 것으로 나타났다. 결론적으로, Fig. 6은 Mehta and Partheniades(1975)에 의해 제시된 식 (4) 및 식 (5)가 매우 타당성 있는 산정식임을 입증하는 결과이며, 또한 본 연구에서 수행된 실험방법 및 결과가 타당하다는 것을 의미한다.

한편, Fig. 6에 제시된 접합곡선은 식 (4) 및 식 (5)의 누적로그-정규분포 함수를 최소자승접합법으로 접합시켜 산정된 곡선으로, Test #M8에서 매개변수 σ_2 및 t_{50} 은 각각 0.73, 32.91 min인 것으로 산정되었다. 각 실험별 산정된 매개변수 σ_2 및 t_{50} 의 값으로부터 최소자승접합법에 의한 접합곡선이 산정되었으며, 과거 연구자들에 의해 수행된 실험결과와 함께 Fig. 7 및 Fig. 8에 제시된다.

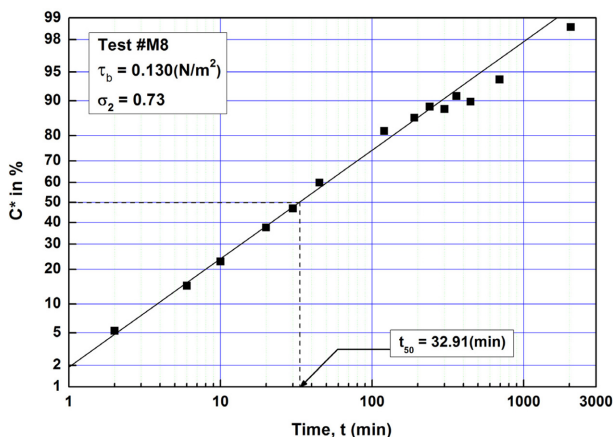


Fig. 6. Variation of C^* with t for Test #M8.

먼저 Fig. 7을 살펴보면, τ_b^* 와 $\log t_{50}$ 은 명백하게 선형관계가 있음을 알 수 있으며, 또한 $\tau_b^* = 1$ 을 기준으로 $\log t_{50}$ 의 변화양상이 명백히 구분됨을 알 수 있다. $\tau_b^* = 1$ 을 기준으로 최소자승법에 의해 도출된 매개변수 $\log t_{50}$ 에 대한 산정식은 식 (7)에 주어진다.

$$\log t_{50} = \begin{cases} 0.88 & \tau_b^* \leq 1 \\ -0.23 \tau_b^* + 1.76 & \tau_b^* > 1 \end{cases} \quad (7)$$

한편, Fig. 8에 제시되는 매개변수 σ_2 의 분석 또한 동일한 방법으로 수행되었는데, $\log t_{50}$ 과 마찬가지로 $\tau_b^* = 1$ 을 기준으로 그 변화양상이 명백히 구분됨을 알 수 있다. $\tau_b^* = 1$ 을 기준으로 최소자승법에 의해 도출된 매개변수 σ_2 에 대한 산정식은 각 구간별로 식 (8)과 같이 표현될 수 있다.

$$\sigma_2 = \begin{cases} 0.95 & \tau_b^* \leq 1 \\ 0.69 & \tau_b^* > 1 \end{cases} \quad (8)$$

Fig. 7 및 Fig. 8에서, 두 매개변수 $\log t_{50}$ 및 σ_2 은 퇴적물의 종류에 따라 크게 변화함을 알 수 있다. 본 연구와 유사하게, 과거 Mehta and Partheniades(1975), Jung et

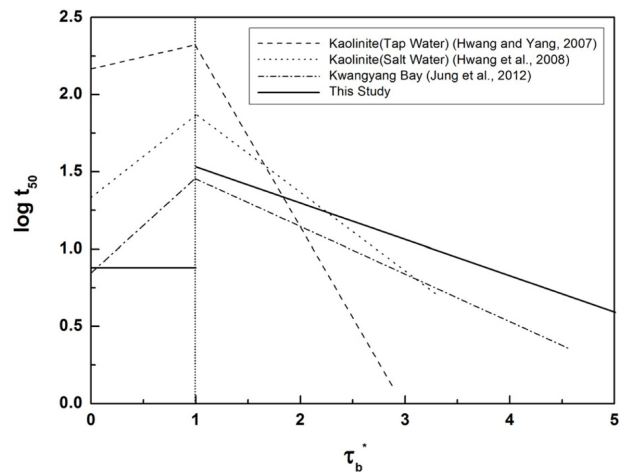


Fig. 7. Comparison of $\log t_{50}$ with τ_b^* .

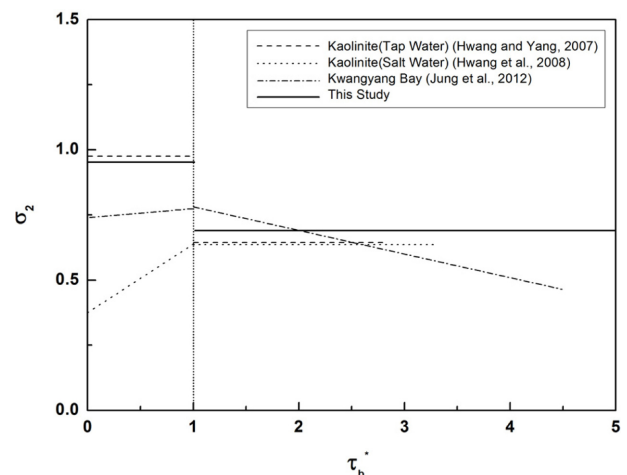


Fig. 8. Comparison of σ_2 with τ_b^* .

al.(2012)은 다양한 퇴적물과 퇴적수에 대한 퇴적실험을 수행하고 각각에 대한 τ_b^* 에 따른 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, 이들 또한 이들 매개변수에 대한 일반적 산정식은 도출하지 못하였으며, 단지 매개변수 σ_2 와 $\log_{t_{50}}$ 이 τ_b , C_o 및 수심 d 의 함수가 된다는 결론만을 제시하였다.

결론적으로, 두 퇴적물 매개변수 σ_2 와 $\log_{t_{50}}$ 값의 정량적 측면에서의 이러한 현저한 변화가 의미하는 바는 점착성 퇴적물의 퇴적물은 퇴적물 자체의 물리·화학적 특성과 퇴적수의 특성에 따라 지역적으로 크게 변화할 수 있다는 것이다. 또한 이러한 사실은 타 지역 퇴적물의 퇴적물 관측자료는 특정 지역에서의 점착성 퇴적물의 이동예측을 위한 수치모형 실험 시에 사용될 수 없다는 것을 나타내며, 결론적으로 퇴적물 산출을 위한 현장관측이나 실내실험이 각 조사대상 지역에서 반복적으로 수행되어야 하겠다.

5.5 퇴적특성에 미치는 물리·화학적 특성의 영향

본 연구에서는 점착성 퇴적물의 퇴적특성에 미치는 물리·화학적 특성의 영향해석을 목적으로, 본 연구와 과거 타 연구 결과와의 비교·검토가 수행되었다.

먼저 본 연구에서 산정된 마산항 점착성 퇴적물의 실험 결과는 과거 Jung et al.(2012)에 의해 수행되었던 광양 점착성 퇴적물의 실험결과와 비교되어 Table 5에 제시된다. Table 5에서 마산항 점착성 퇴적물의 평균입경은 14.4 μm 로 광양 점착성 퇴적물의 평균입경인 21.8 μm 보다 약 1.5배 작은 것으로 나타났으며, 광물질 구성성분은 두 퇴적물 모두 석영이 주된 광물이고 유기물 함량은 마산항 점착성 퇴적물이 광양 퇴

적물에 비해 약 6.5배 큰 것으로 나타났다. 일반적으로 점착성 퇴적물은 평균입경이 작을수록, 유기물 함량이 클수록 점착력이 증가하는 경향이 있으며, 광물학적 측면에서 보면, 보편적으로 점착성 퇴적물에 많이 함유되어 있는 고령토, Illite, 녹니석 등의 광물성 점토보다 석영이 훨씬 작은 점착력을 갖는다(Lick and McNeil, 2001; Mehta, 2013). 따라서, 석영으로 동일하게 나타난 광물질 주성분에 대한 부분은 차치하고, 상대적으로 평균입경의 크기가 작고, 유기물 함량이 큰 마산항 점착성 퇴적물 시료가 더 큰 점착력을 가질 것으로 판단된다. 퇴적물의 점착력이 크다는 것은 개개의 토사입자의 결합력이 더 강하고 결과적으로 더 큰 퇴적물, 즉 τ_{bmin} 이 더 작다는 것을 의미하나, 마산항과 광양 점착성 퇴적물의 τ_{bmin} 은 각각 0.100 N/m², 0.110 N/m²으로 거의 비슷한 값을 갖는 것으로 나타났는데, 이에 평균입경 및 유기물 함량이 퇴적특성에 미치는 영향은 그다지 크지 않을 것으로 판단된다.

한편, 점착성 퇴적물의 퇴적특성에 미치는 양이온교환능력(CEC)의 영향해석을 위하여 본 연구결과와 과거 타 연구결과와의 비교검토가 이루어졌는데, 과거 염수조건하 점착성 퇴적물의 양이온교환능력의 영향에 대한 연구는 단지 Mehta and Partheniades(1975), Hwang and Yang(2007)의 연구만 있을 뿐, 이외에는 거의 전무하다. 이들의 실험조건 및 결과가 정리되어 본 연구결과와 함께 Table 6에 주어진다.

Mehta and Partheniades(1975)는 염수조건에서 점착성 퇴적물의 퇴적특성에 미치는 양이온교환능력(CEC)의 영향을 해석하기 위하여, CEC에 따른 최소전단응력 τ_{bmin} 및 $(\tau_b^* - 1)_{50}$ 의 변화를 도시한 바 있다. Mehta and Partheniades(1975)의 연구결과와 함께 과거 Hwang and Yang(2007)의 결과와 본 연구결과가 함께 Fig. 9 및 Fig. 10에 제시된다.

Table 5. Comparison of physico-chemical properties and τ_{bmin}

Researcher	Sediment	Mean diameter (μm)	Main mineralogical component	Organic contents (%)	τ_{bmin} (N/m ²)
Jung et al.(2012)	Kwangyang Bay	21.8	석영	2	0.110
This Study	Masan Port	14.4	석영	13	0.100

Table 6. Experimental conditions, CEC, $(\tau_b^* - 1)_{50}$ and τ_{bmin} in the previous studies

Researcher	Sediment	CEC (meq/100g)	Fluid	$(\tau_b^* - 1)_{50}$	τ_{bmin} (N/m ²)
Mehta & Partheniades (1975)	Kaolinite (Salt Water)	77 9 (mean)	Salt Water	0.58	0.150
	50% Kaolinite & 50% Bay mud	16.5	Salt Water	0.88	0.119
	San Francisco Bay mud	24	Salt Water	1.18	0.096
	Maracaibo Sediment	39	Salt Water	1.50	0.075
Hwang and Yang (2007)	Kaolinite	20	Tap Water	0.41	0.175
This Study	Masan Port	35.8	Salt Water	0.87	0.100

Fig. 9 및 Fig. 10의 결과를 살펴보면, CEC가 증가할수록 τ_{bmin} 은 감소하고 $(\tau_b^* - 1)_{50}$ 은 증가하는 양상을 보인다. 수돗물 조건에서 실험이 수행된 Hwang and Yang(2007)의 연구를 제외하고, 염수조건 하에서 수행된 실험에서 CEC가 증가할수록 입자간 응집력은 향상되며, 따라서 개개의 플록 응집강도 또한 증가된다. 이는 퇴적물의 CEC가 큰 경우에 주어진 바닥전단응력 하에서도 퇴적될 수 있는 결합력이 강한 무거운 플록들이 더 잘 형성될 수 있다는 것을 의미한다. 결과적으로 퇴적물의 CEC가 더 클수록 더 큰 퇴적플록과 더 작은 최소전단응력을 갖는다는 것으로 해석될 수 있다.

한편, 과거 Mehta and Partheniades(1975)의 연구에서 측정된 고령토의 양이온교환능력은 77 meq/100 g로써, 고령토의 일반적인 CEC 범위로 알려진 3~15 meq/100 g를 벗어난 것으로 측정되었다. 이에 Mehta and Partheniades(1975)는 고령토의 일반적 CEC 범위의 평균값을 취한 9 meq/100 g을 제시하였다. 또한, Hwang and Yang(2007)은 수돗물 조건에서 고령토 퇴적물을 이용한 퇴적실험을 수행하고 CEC 값으로 20 meq/100 g을 제시하였는데, 실험에서 사용된 퇴적수의 염도가 0‰인 점을 고려할 때 CEC가 0에 가까운 값을 가질 것이라 주장하였다. 본 연구에서 산정된 CEC 값은 과거

Mehta and Partheniades(1975)의 연구결과와 정량적으로 큰 차이가 있는 것으로 나타났는데, 앞서 언급한 바와 같이, 동일한 염수조건에서 수행한 퇴적실험이라 하더라도 CEC 값에 영향을 미치는 요인의 다양성으로 인하여 정확한 측정이 어렵다는 한계성을 가진다.

본 연구에서는 점착성 퇴적물의 퇴적특성에 미치는 물리·화학적 특성의 영향 해석을 위하여 단지 2개의 연구결과들만이 비교·분석되었는데, 자연시료를 이용한 퇴적특성 연구결과가 거의 전무하여 향후 다양한 자연시료를 이용한 퇴적실험 및 물리·화학적 특성 연구가 지속적으로 수행되어야 할 것으로 판단된다. 또한, Mehta(1986)는 컨시스턴시 특성, 전단특성 등을 포함한 8가지 항목을 물리화학적 기본특성 조사 항목으로 제시하였으며, Berlamont et al.(1993)은 생물학적 특성까지 포함된 총 28개의 항목을 필수 조사항목으로 제시한 바 있으므로, 다양한 물리·화학적 특성의 조사를 통하여 점착성 퇴적물의 퇴적특성을 해석하는 것은 매우 의미있는 사항이라고 판단된다.

6. 결 론

본 연구에서는 마산항 점착성 퇴적물의 퇴적특성을 정량적으로 산정하기 위하여 전복대 환형수조를 이용한 퇴적실험이 수행되었는데, 퇴적실험은 바닥전단응력의 크기를 변화시켜 가며 총 18회의 퇴적실험이 수행되었으며 실험결과로부터 퇴적특성의 정량적 산정 및 결과의 타당성 해석 등에 대한 검토가 수행되었다.

퇴적실험 결과에 따르면, 최소전단응력보다 큰 바닥전단응력 하에서 수층 부유사 농도는 명백히 평형농도에 도달하게 되고, 최소전단응력보다 작은 바닥전단응력 하에서는 모든 수층 부유사농도가 궁극적으로 퇴적되는 현상이 관측되었다. 이는 과거 Mehta and Partheniades(1975), Jung et al.(2012)의 결과와 일치하는 결과로써, 평형농도의 발생여부를 나타내는 최소전단응력이 명백히 존재함을 보여준다.

마산항 점착성 퇴적물의 최소전단응력은 0.10 N/m²으로 산정되었으며, 과거 타 연구결과와의 비교검토를 통하여 연구 결과의 타당성이 입증되었다. 또한, $\tau_b > \tau_{bmin}$ 의 조건하에서 상대 평형농도 C_{eq}^* 는 $(\tau_b^* - 1)$ 의 함수로 누적 로그-정규 분포 공식을 이용하여 산정될 수 있음이 입증되었다. 상대평형농도 산정식의 매개변수 σ_1 과 $(\tau_b^* - 1)$ 은 각각 0.54와 0.87로써, τ_{bmin} 에 따른 $(\tau_b^* - 1)_{50}$ 의 변화는 과거 Mehta and Partheniades(1975), Hwang and Yang(2007) 및 Jung et al.(2012)의 결과와 매우 잘 일치하는 것으로 나타났으며, Hwang et al.(2008), Jung et al.(2012)이 주장한 바와 같이 σ_1 은 퇴적물과 퇴적수의 특성에 따라 그 값이 변화하는 것으로 나타났다. 한편, 상대퇴적량(C^*) 산정을 위한 매개변수 σ_2 와 $\log t_{50}$ 의 값은 $\tau_b^* = 1$ 을 기준으로 명확히 변화됨이 확인되었으나, 매개변수 σ_2 와 $\log t_{50}$ 의 값은 변화의 다양성으로 인

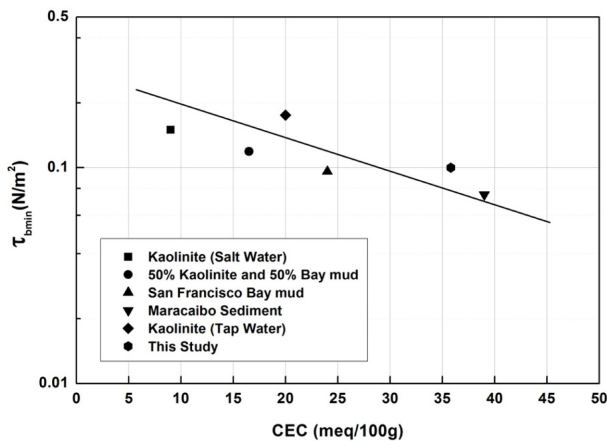


Fig. 9. Variation of τ_{bmin} with CEC.

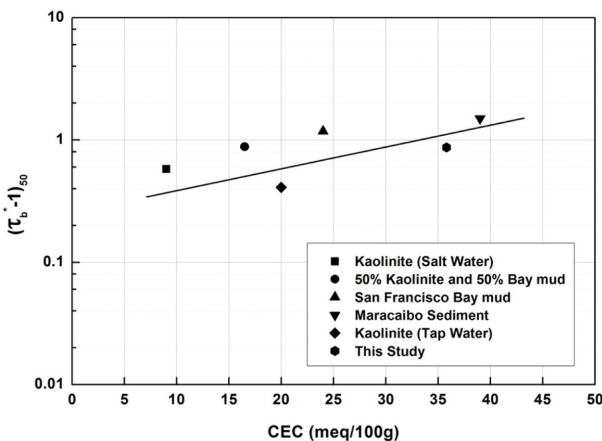


Fig. 10. Variation of $(\tau_b^* - 1)_{50}$ with CEC.

하여 산정식의 타당성 검증은 향후 연구과제로 남겨진다.

본 연구결과는 자연시료를 이용한 퇴적실험으로써, 국내 최초로 점착성 퇴적물의 퇴적특성과 물리·화학적 특성과의 연계해석이 수행되었다는 점에서 큰 의미를 갖는다. 본 연구를 통하여 정량적으로 산정된 마산항 점착성 퇴적물의 퇴적특성은 마산항 개발로 인해 발생 가능한 항로매몰의 예측을 위한 수치모형 실험시에 입력자료로 사용될 수 있을 뿐만 아니라, 수층 부유사농도의 연직구조 변동 예측, 수질 및 퇴적물오염 저감을 위한 대책방안 수립 등 다양한 목적으로 크게 활용될 수 있을 것이다.

감사의 글

이 논문은 2015년 해양수산부 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(연안침식대응기술개발). 저자들은 전북대학교 방재연구센터에 소속되어 연구를 진행하였습니다.

References

- American Society for Testing and Materials (1987). Annual Book of A.S.T.M. Standards, 04.08, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, U,S,A.
- Berlamont, J., Ockendon, M., Toorman, E. and Winterwerp, J. (1993). "The characterisation of cohesive sediment properties", Coastal Engineering, Vol. 21, 105-128.
- Hwang, K.-N., Cho, Y.S. and Lee, T.H. (2002). Settling Characteristics of Saemankeum Fine-Cohesive Sediments : Effects of Physico-Chemical Properties. J. of Korea Water Resources Association, 35(5), 475-484 (in Korean).
- Hwang, K.-N., Kim, N.H. and Lee, Y.H. (2008). The Laboratory Study on Estimation of Depositional Properties of Kaolinite Sediments in Saltwater Condition. J. of Korea Water Resources Association, 41(9), 863-872 (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).
- Hwang, K.-N. and Yang, S.-H. (2007). A Laboratory Study on Depositional Properties of Kaolinite Sediments. J. of Korean Society of Civil Engineers, 27(6B), 679-687 (in Korean)
- Jung, E.-T., Kim, Y.M., Kim, D.H. and Hwang, K.-N. (2012). An Experimental Study on Depositional Parameters of Cohesive Sediments in Semi-closed Bay. Journal of Korean society of coastal and ocean engineers, 24(3), 159-165 (in Korean).
- Kim, J.-J. (1989). An Experimental Study of Erosion and Deposition of Cohesive Sediment. Ph.D. Dissertation, Seoul National University (in Korean).
- Krone, R.B. (1962). Flume studies of the transport of sediment in estuarial shoaling process, Final Report, Hydraulic Engineering Laboratory and Sanitary Engineering Research Laboratory, University of California, Berkeley, California.
- Lee, D.J. (2011). A Study on Development Strategy of the Masan Port by Port Environmental Change. Master's Thesis, Myongji Univ., The Graduate School of Real Estate and Distribution Management (in Korean).
- 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.
- Mehta, A.J. and Partheniades, E. (1975). An investigation of the depositional properties of flocculated fine sediments. J. Hydraul. Res., 13(4), pp. 361-381.
- Mitchell, J.K. (1993). Fundamentals of Soil Behavior. 2nd ed. New York : John Wiley & Sons, Inc.
- Moon, H.-S. (1996). Clay Mineralogy, Minum Books, 509-526 (in Korean).
- National Fisheries Research & Development Institute (1997). Method of process test of marine environment. The Korean Society of Oceanography (in Korean).
- Rosillon, R. and Volkenborn, C. (1964). Sedimentation de Material Cohesivoen Agua Salada. Thesis, Univ. of Zulia, Maracaibo, Venezuela.
- Park, S.-Y. (2004). The Study on Settling and Depositional Properties of Fine Cohesive Sediment with regard to Turbulent Shearing. Master's Thesis, Chonbuk National University (in Korean).
- Partheniades, E. (1965). Erosion and deposition of cohesive soils. Journal of the Hydraulics Division. 91(1), 105-138.
- 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.

Received 26 October, 2015

Revised 2 December, 2015

Accepted 9 December, 2015