

한강 하구역 점착성 퇴적물 침강속도의 지엽적/공간적 변화

서영덕* · 진재율** · 황규남***

*전북대학교 토목공학과

**한국해양연구원 연안개발연구본부 해양에너지·환경개선연구사업단

***전북대학교 토목공학과·공업기술연구센터

Local/Spatial Variation of Settling Velocities of Cohesive Sediments from Han Estuary

YOUNG-DEOK SEO*, JAE-YOULL JIN**, AND KYU-NAM HWANG***

*Dept. of Civil Eng, Chonbuk National Univ, Jeonbuk, Korea

**Coastal Engineering Research Department, KORDI, AnSan, Korea

***Dept. of Civil Eng & RICT, Chonbuk National Univ, Jeonbuk, Korea

KEY WORDS: Cohesive sediments 점착성 퇴적물, Settling velocity 침강속도, Physico-chemical properties 물리·화학적 특성, Han estuary 한강하구

ABSTRACT: The purpose of this study is to quantify the settling velocities of cohesive sediments from Han estuary and to evaluate their local variation within Han estuary. This study also includes an estimation of their spatial variation, for which the settling velocities of cohesive sediments from Han estuary are compared with those for sediments from other regions. At the same time, physical-chemical properties, such as grain size distribution, the percentage of organic contents, mineralogical composition etc are measured in this study in order to examine their correlation with settling velocities and their effect on settling velocities. Results from settling tests show that the settling velocities of Han estuary mud varies in the range of two orders of magnitude (from 0.01 to 1.5 mm/sec) over the corresponding concentration range of 0.1 to 80 g/L, and a feature of the settling velocity profile is quite different in quantity as compared to those of previous studies for muds from other regions. Particularly in the flocculated settling region, the settling velocity for Han estuary muds is shown to be larger than that of Saemankum and Keum estuary sediments, while in the hindered settling region all three sediments are shown to have a similar settling velocity. However, local variability of the settling velocities within Han estuary is shown to be insignificant.

1. 서 론

넓은 의미에서 하천수계의 가장 하류지역을 지칭하는 하구(Estuary)는 담수와 해수가 만나 동수역학적, 화학적, 생물학적 및 퇴적학적 상호작용이 발생하는 곳이라 할 수 있다. 어원적으로 'Estuary'는 조석을 의미하는 라틴어인 'Aestus'에서 유래하였는데, 이는 조석 운동의 영향을 크게 받는 하천수계역을 가리킨다.

모든 자연 현상이 그러하듯이, 하구역에서의 물리적 역학관계 또한 자체적으로 준평형상태(Quasi steady-state)를 이루고 있다고 할 수 있다. 하구역의 인위적인 개발은 준평형상태로 유지되고 있는 물리적 역학관계를 교란하게 되는데, 그 결과는 우리에게 도움이 될 때도 있으나 때로는 피해를 주기도 한다.

본 연구의 조사대상 해역인 한강 하구는 한강과 임진강, 예성강 하류를 포함해 유역 면적이 130만km²에 달하는 광활한

지역으로 비록 신곡 및 잠실 수중보가 존재하기는 하나, 우리나라 4개강 하구역중 유일하게 하구둑이 건설되지 않아 조수의 출입이 자유롭고 자연적인 하천지형과 생태계가 잘 보존된 곳이다. 이러한 한강 하구역은 보존의 높은 상징성에도 불구하고 지난 10여 년간 영종도 공항 건설, 김포 및 송도 매립지 조성, 골재채취 등의 선점식 개발과 이용이 이뤄져 왔으며, 최근 남북관계 발전·평화 변영의 활성화로 서해시대를 대비한 한강 하구의 공공개발, 한강·임진강 하구 모래 준설 프로젝트 등의 종합발전구상이 구체화됨으로써 한강 하구의 개발압력이 더욱 더 커지고 있는 실정이다.

한강 하구역은 하천류 보다 조류에 의한 에너지가 상대적으로 매우 큰 대조석 하구(Macro-tidal estuary)이며 또한 조류에 의한 난류현상으로 인하여 담수와 해수의 혼합이 매우 잘 이루어지는 강혼합형 하구(Well-mixed estuary)로, 표층 퇴적물의 침식과 퇴적에 따른 하상변동 및 그에 따른 수층 부유사 농도의 시공간적 변화가 크게 발생할 수 있는 해역이다. 또한 한강 하구를 포함하여 대부분의 하구에는 소위 '갯벌'이라 불리는 미세 점착성 퇴적물이 널리 분포되어 있는데, 이러한 점토 입자들은 부유 혹은 용해상태의 여러 가지의 독성을

교신저자 황규남: 전주시 덕진구 덕진동1가

063-270-2345 khwang@chonbuk.ac.kr

가진 오염물질과 쉽게 결합하는 경향이 있으며, 작은 유동력에 의해서도 쉽게 부유될 수 있는 특성을 가지고 있어 수질 오염의 주 요인이 되기도 한다.

따라서, 한강 하구역은 지난 10년간 기 수행된 대규모 개발은 물론 추가적인 많은 개발 계획으로 인하여, 해안침식 및 항로매몰 등의 문제가 발생될 여지가 매우 높은 해역이라 할 수 있으며, 또한 수질 오염 및 생태계 오염 등의 문제에서도 자유로울 수 없는 해역이라 할 수 있다. 실제로, 영종도 북동단에서는 최근 대규모의 퇴적이 발생하고 있는 것으로 파악되고 있으며, 강화도 남단 또한 퇴적으로 인한 해저지형 변동이 크게 발생된 것으로 알려지고 있다. 이러한 하구에서의 하상변동 및 발생 가능한 수층 부유사 농도의 평가 혹은 예측 시 미세 점착성 퇴적물의 제반 이동 특성에 관한 연구는 필수적 사항이며, 그 중에서도 특히 침강속도에 대한 정량적 평가는 퇴적물 이동 특성의 규명을 위해 가장 기초적이고도 중요한 사항이다.

일반적으로 하구의 미세 점착성 퇴적물은 무기성 광물, 유기물 및 생화학물의 혼합체이며, 광물 입자들은 주로 점토와 실트로 구성되어 있다. 이러한 혼합체의 침강특성은 입자간의 응집 현상에 의해 크게 영향을 받으며, 그 응집강도는 또한 광물질 구성, 양이온 전도율, 입경분포, 유기물 함량 등으로 묘사되는 퇴적물 자체의 물리·화학적 특성에 따라 크게 변화된다(Mehta, 1986). 따라서 부유 입자에 부여되는 수동학적 조건이 동일하다 하더라도, 퇴적물 자체의 특성에 따라 그 침강특성은 달라지게 되며, 이러한 'Site-specific'한 특성으로 인하여 미세점착성 퇴적물의 침강속도에 대한 이론적 해는 현재 없으며 현장이나 실내 실험을 통하여 측정하는 것이 최선이다.

본 연구에서는 한강 하구역 점착성 퇴적물의 표본채취, 현장관측 및 실내실험을 통하여 한강 하구역 점착성 퇴적물의 침강속도를 정량적으로 산정하고, 한강 하구역내에서의 지역적 변화(Local variation) 및 타 지역 퇴적물의 침강속도 산정 결과와의 비교/분석을 통한 공간적(Spatial) 변화를 해석하였다. 또한 실험분석을 통하여 한강 하구역 점착성 퇴적물의 물리·화학적 특성(입경분포, 유기물 함량, 광물질 구성) 및 해수의 특성을 정량적으로 조사한 후, 이러한 특성들과 침강속도간의 상관관계 및 침강속도의 정량적 변화에 미치는 영향에 대해 해석하였다.

2. 현장 표본 채취

한강 하구 점착성 퇴적물의 물리·화학적 특성 및 침강특성 조사를 위한 퇴적물 표본시료는 2007년 5월 15일에 4개 정점(#1~#4)에서 채취되었으며, 그 후 약 2주 후(2007년 5월 29일)에 1개 정점(#5)에서 추가로 채취되었다. 퇴적물 표본 시료는 채니기(Grab sampler)를 이용하여 각 정점별로 약 20 liter가 채취되었으며, 또한 현장의 해수 조건을 반영시키기 위하여 동일 정점에서 해수가 채취되었고, 채취된 해수는 침

강실험의 전 과정에서 사용되었다. 각 퇴적물 시료의 채취 정점과 경·위도 좌표계는 Fig. 1과 Table 1에 각각 주어진다.

한편, 퇴적물 표본시료 및 해수 채취시의 유체의 특성을 파악하기 위하여, 퇴적물 표본시료가 채취되는 지점과 동일한 정점에서 동일 시간에 수층의 염도, 수온 및 pH가 표층(h2/10), 중층(h6/10), 저층(h8/10)의 3개 수심에서 관측되었다. 퇴적물 표본시료 채취지점의 수심(h)은 각 정점별로 2.3m에서 15m까지 변화하였으며, 채취당시의 수온, 염도, 및 pH의 수심평균 값들은 각 정점별로 Table 2에 주어진다. 수온, 염도 및 수심은 노르웨이 Aanderaa사의 S/T/D Sensor 3230을 사용하여 측정되었다.

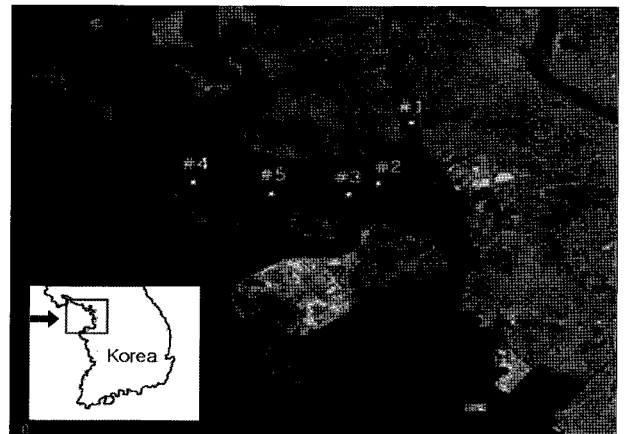


Fig. 1 Locations of sediment sampling sites within Han estuary

Table 1 Longitudes and latitudes of sediment sampling sites

Site No.	N	E
#1	37° 36' 48.8"	126° 33' 10.9"
#2	37° 34' 26.6"	126° 31' 16.1"
#3	37° 33' 28.1"	126° 29' 26.8"
#4	37° 33' 26.7"	126° 20' 2.20"
#5	37° 33' 10.6"	126° 25' 34.5"

Table 2 Basic sea water conditions at the time of sediment sampling

Site No.	Salinity (%)	Water Temp.(°C)	pH	Depth (m)
#1	21.5	17.2	7.63	2.3
#2	27.0	17.5	7.72	3.7
#3	28.1	17.2	7.79	7.7
#4	29.6	17.5	7.77	5.0
#5	27.3	17.6	7.94	15.0

3. 물리·화학적 특성 실험

한강 하구역 5개 정점에서 채취된 총 5개의 퇴적물 표본시료에 대하여 물리·화학적 특성 조사를 위한 실험이 수행되었다. 수행된 실험은 입경분포, 유기물 함량, 광물질 구성에 대한 조사로, 도출된 결과들은 한강 하구 내에서의 침강속도의 지역적 변화 및 과거 타 지역 연구결과와의 비교를 통한 공간적 변화 분석시에 사용되었다.

3.1 입경분포

일반적으로 입경분포는 체분석, 파펫법, 비중계법 등을 통하여 결정되는데, 본 연구에서 입경분포는 체분석과 비중계법을 병행하여 분석되었다. 우선 각 정점별로 채취된 표본시료는 No.200체($\phi=75\mu m$)를 기준으로 하여 습식체질법(Wet-sieving)으로 분리되었고, No.200체를 통과한 시료의 입경분포는 비중계법으로 측정되었으며, 체에 남은 시료의 입경분포는 체 분석(Sieve analysis)을 통하여 측정되었다. 입도분석 실험은 ASTM이 제시한 방법에 따라 수행되었으며, 입경분포 분석에 대한 자세한 사항은 황규남 등(2002)에 의해 주어진다.

체분석과 비중계법을 통하여 산정된 각 정점별 입경분포 곡선은 Fig. 2에 주어진다. 그림으로부터 알 수 있는 바와 같이, 한강 하구역 퇴적물의 입경은 0.001~0.5mm의 범위에 분포하며, 평균입경은 정점별로 0.014mm에서 0.039mm까지 변한다. 또한 모래의 함량은 각 정점별로 약 5%에서 25%까지 변화하며, 점토의 함량은 20% 내외이다.

정점별 입경분포 곡선은 정점 #5의 퇴적물이 상대적으로 가장 세립질의 분포를 갖는 것으로 나타났으며, 반면에 정점 #2와 #4 퇴적물이 서로 유사한 값을 가지며 가장 조립질의 분포를 보이는 것으로 나타났다. 정점 #1과 #3 퇴적물 또한 서로 유사한 입경분포를 갖는데, 정점 #5 퇴적물보다는 다소 조립한 분포를 보이는 것으로 나타났다.

비록 정점별로 약간의 차이를 보이기는 하나, 그 평균입경은 0.02~0.03mm 내외로, 전체적으로 볼 때에 정점간의 큰 변화는 없는 것으로 판단된다. 따라서, 한강 하구역 5개 퇴적물 시료의 입경분포 분석결과를 모두 통합하여 평균된 입경분포가 산정되었으며, 그 결과는 과거 타 지역 퇴적물에 대한 결과와 함께 Fig. 3에 주어진다. Fig. 3에 주어진 바와 같이 평균된 한강 하구역 퇴적물의 입경분포는 금강 하구역 퇴적물과 유사하고 새만금 퇴적물보다는 훨씬 세립한 분포를 가지며, Okeechobee호 퇴적물보다는 조립한 분포를 갖는 것으로 나타났다.

3.2 유기물 함량

본 연구에서 유기물 함량 실험은 해양환경공정시험법(국립수산진흥원, 1997)에 따라 강열감량법으로 수행되었다. 우선, 현장 채취된 총 5개의 퇴적물 표본시료는 동결 건조 후에 곱게 분쇄되었으며, 곱게 분쇄된 시료 중 일정량(약 5g)이 550°C의 전기로에서 약 2시간 동안 가열되었다. 퇴적물에 포함된 유기

물 함량(%)은 가열전의 시료무게와 가열후의 시료무게의 차이에 의해서 산정되었으며, 그 결과는 타 지역에서의 결과들(황규남 등, 2002; 류홍렬 등, 2006; Hwang, 1989)과 함께 Table 3에 주어진다.

표에서 알 수 있는 바와 같이, 한강 하구역 점착성 퇴적물의

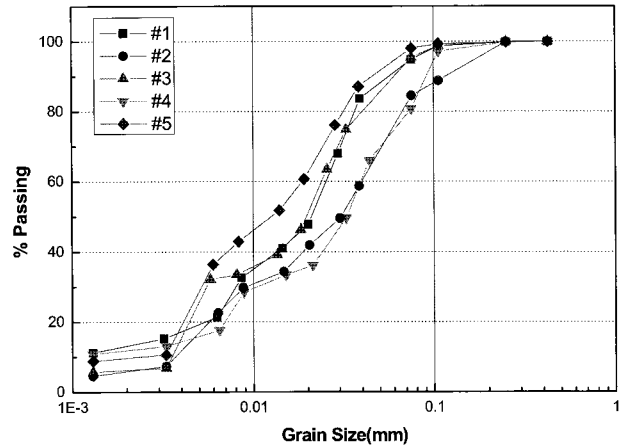


Fig. 2 Variation of grain size distribution within Han estuary

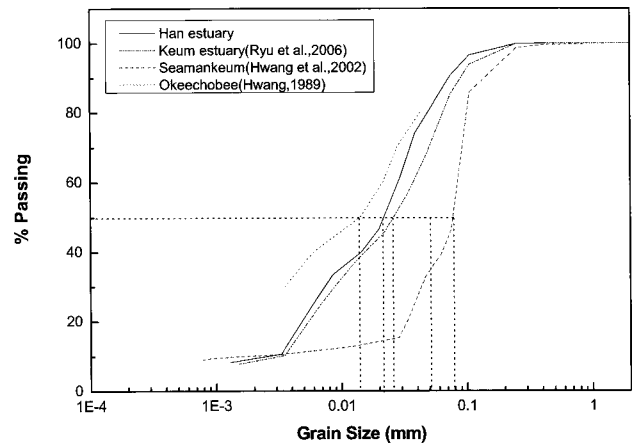


Fig. 3 Comparison of grain size distribution of cohesive sediments from Han estuary for other regions

Table 3 Comparison of organic contents in cohesive sediments from Han estuary and for other regions

Region	Organic contents (%)	Mean(%)
Han estuary	2.0~4.0	3.0
Keum estuary	1.9~4.5	3.15
Saemankeum	0.8~2.8	1.9
Lake Okeechobee	36~43	40

유기물 함량은 정점별로 최소 2%(정점 #4)에서 최대 4%(정점 #5)로, 입경분포와 마찬가지로 정점별 변화는 그다지 크지 않은 것으로 나타났다. 한편, 한강 하구역 퇴적물의 평균 유기물 함량은 비교적 적은 3%로 금강 하구의 경우와 거의 동일하고, 시화호 및 새만금 해역 퇴적물과의 차이는 미미하나, 유기물 함량이 40%인 Okeechobee호와는 약 13배 정도 차이가 나는 것으로 나타났다.

3.3 광물질 구성 성분

광물질 구성성분은 총 5개의 퇴적물 표본 시료 중 대표성을 갖는 1개 표본시료(#5)에 대해서만 정량적으로 분석되었으며, 나머지 4개 시료(#1~#4)는 정성적으로 분석되었다. 정량적 분석은 한국지질자원연구원에 의해 PHILIPS사의 X-pertMPD 회절분석기로 수행되었으며, 정성적 분석은 한국지질자원연구원의 지원하에 전북대학교 공동시험소가 보유하고 있는 RIGAKU사의 D/MAX-2500 회절분석기로 수행되었다.

한국지질자원연구소의 지원하에 수행된 X-ray diffractogram의 정성적 분석결과에 따르면, 전체적으로 모든 퇴적물의 광물질 구성 성분은 정점별로 변화가 거의 없이 유사한 분포양상을 갖는 것으로 해석되었다. 따라서, 정점 #5 퇴적물에 대한 정량적 분석결과가 전체 5개 퇴적물 시료의 광물질 구성성분을 대표한다고 할 수 있는데, 정점 #5 퇴적물에 대한 X-ray diffractogram은 Fig. 4에 주어지며, 그 정량적 분석결과는 과거 타 지역 퇴적물에 대한 분석 결과와 함께 Table 4에 주어진다.

표에 주어진 바와 같이, 한강 하구역 퇴적물의 광물질 구성 성분은 Muscovite를 포함하여 석영, 미사장석 등의 점토성 광물이 약 72%를 차지하며, 점토 광물은 단지 17% 뿐인 것으로 나타났다. 한편, 점토광물 중에서 가장 지배적인 성분은 일라이트로 7.5%를 차지하며, 녹니석과 고령토는 각각 5%와 4.2%로 거의 비슷한 양이 포함되어 있는 것으로 나타났다. 석영 및 장석 등을 제외한 순수 점토 광물만을 고려할 때에, 한강 하구역 퇴적물의 광물질 구성 성분은 정성적으로 금강 하구(류홍렬 등, 2006) 및 새만금(황규남 등, 2002) 퇴적물의 구성 성분과 거의 동일하다고 하겠다. 한편, Okeechobee호 퇴적물은 한강 하구역 퇴적물과는 달리 고령토가 지배적인 구성 성분이며, 특히 점성이 아주 강한 Montmorillonite 및 Sepiolite

를 포함하고 있는 것이 흥미롭다.

4. 침강실험

침강 실험은 특수 제작된 높이 1.8m의 침강수주(Settling column)를 이용하여 수행되었다. 수주 본체는 내경 17cm의 Plexiglass로 제작되었으며, 직경과 길이가 각각 5mm, 10cm인 Tap hose가 각기 다른 10개의 높이에서 측면에 부착되어 있다. 침강실험이 진행 중인 침강수주의 모습은 Fig. 5에 주어진다.

침강실험은 Multi-depth 부유사 농도 채취방법으로 수행되었으며, 각 부유사 농도에서의 침강속도는 침강수주에서의 시간과 높이에 따른 농도변화 측정값들에 Ross(1988)가 개발한 침강속도 산정프로그램을 적용하여 결정되었다. 침강실험 과정 및 Ross(1988)의 수치모형을 이용한 침강속도 산정방법 등에 대한 자세한 사항은 황규남(2000)에 주어진다.

본 연구의 목적은 미세 점착성 퇴적물에 대한 침강특성 조사이므로, 각 정점에서 채취된 퇴적물 시료 중에 직경이 74 μ m인 No.200 체로 습식 체질되어 분리된 미세 토사 입자만이 침강실험에 사용되었다. 침강실험은 현장 채취된 총 5개의 퇴적물 시료에 대하여 총 28회 수행되었으며, 각 실험별 실험조건들은 Table 5에 주어진다.

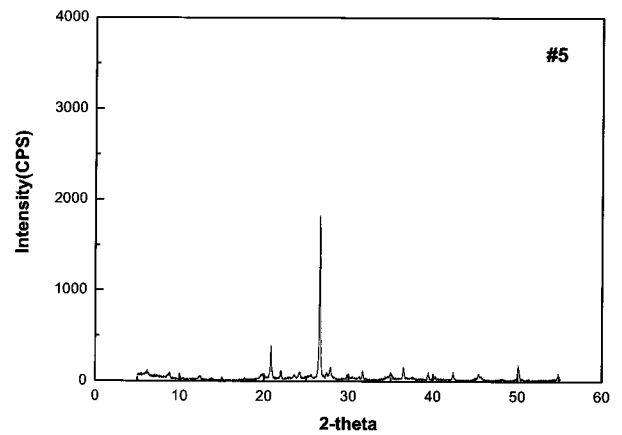


Fig. 4 X-ray diffractogram of cohesive sediments from Site #5 within Han estuary

Table 4 Comparison of mineralogical composition in cohesive sediments from Han estuary with other regions

Rank	Han estuary	Content	Rank	Keum estuary	Rank	Saemankeum	Rank	Lake Okeechobee
1	Quartz	42.8%	1	Quartz	1	Quartz	1	Kaolinite
2	Albite	15.2%	2	Albite	2	Feldspal, Albite	etc	
3	Muscovite	12.3%	3	Illite	3	Illite		Montmorillonite
4	Illite	7.5%	4	Kaolinite	4	Kaolinite		Sepiolite
5	Chlorite	5.0%		/Chlorite	5	Chlorite		Quartz
6	Kaolinite	4.2%						

각 실험별로 수주 내 현탁액의 온도변화는 1°C 이하로써 실험 중의 온도 변화는 매우 작았으며, 실험 전체로 볼 때에도 현탁액의 온도 변화는 최대 1.5°C에 불과하였다. 이러한 크기의 온도 변화가 점착성 퇴적물의 침강속도에 미치는 영향은 매우 미미한 것으로 알려지고 있으므로(황규남, 2000), 본 실험에서 온도의 영향은 충분히 배제된 상태라고 하겠다.

각 실험에서의 초기 부유사 농도 C_0 값 또한 Table 5에 주어진다. 효율적인 실험결과, 즉 가능하면 적은 수의 실험으로 고루 분포된 부유사 농도 영역에서의 침강속도 데이터를 얻기 위하여 초기 부유사 농도는 실험별로 0.45g/L에서 29.40g/L까지 변화시켰다. 여기서 초기 부유사 농도는 부유사의 농도가 전 수심에 대해 거의 균일하도록 충분히 잘 섞인 시점의 시간, 즉 시간 0에서의 부유사 농도를 나타낸다.

중량 분석을 통하여 침강수주의 각기 다른 높이와 시간에서 채취된 탁수들의 부유사 농도가 측정되었고, 각 실험별로 농도 단면도가 작성되었으며, 이 농도단면도들은 Ross(1988)의 수치프로그램에 입력값으로 입력되어 침강속도가 산정되었다. 각 정점별 점착성 퇴적물에 대한 침강속도와 접합곡선이 각각 산정되었으며, 그 중 대표적인 예로써 정점 #4 퇴적물에 대한 침강속도 산정 결과 및 접합곡선에 사용된 각 인자 값들이 Fig. 6에 주어진다.

데이터가 다소 분산되어 있기는 하나, Fig. 6은 부유사 농도가 증가함에 따라 침강속도가 증가하는 응집침강 영역($0.1 < C < 5g/L$)과, 역으로 침강속도가 감소하는 간섭침강 영역($5 < C < 60g/L$)을 명확히 보여주고 있다. 데이터가 다소 분산되는 이유는 부유사 입자가 침강하는 과정에서 입자간의 충돌과 응집현상으로 인하여 침강속도에 있어 다소 시간적 오차가 발생하였던 까닭으로 여겨지며, 또한 초기에 균일한 농도 분포를 얻기 위하여 침강수주 안에서 Bubbler tube로 혼합하는 방법을 적용하였는데 이러한 실험과정에서도 다소 오차가

Table 5 Settling test conditions

Site No.	Test No.	Temp. of Suspension(°C)	C_0 (g/L)
#1	1	17.0 ~ 17.5	1.80
	2	17.2 ~ 17.5	3.00
	3	17.0 ~ 17.0	6.97
	4	17.0 ~ 18.0	10.89
	5	17.5 ~ 17.5	16.75
	6	17.5 ~ 18.5	23.78
#2	1	17.5 ~ 18.0	2.15
	2	17.8 ~ 17.8	6.54
	3	17.6 ~ 18.2	14.59
	4	17.5 ~ 17.5	19.01
	5	18.0 ~ 18.0	25.03
#3	1	17.5 ~ 18.0	0.69
	2	17.2 ~ 18.0	3.05
	3	17.5 ~ 17.5	7.75
	4	17.0 ~ 17.8	14.43
	5	17.5 ~ 18.0	21.02
	6	18.0 ~ 18.0	27.27
#4	1	17.5 ~ 18.0	0.45
	2	18.0 ~ 18.0	2.52
	3	18.0 ~ 18.0	5.89
	4	18.0 ~ 18.0	12.12
	5	18.0 ~ 18.0	19.26
	6	18.0 ~ 18.5	27.11
#5	1	17.0 ~ 17.0	0.98
	2	17.0 ~ 18.0	4.22
	3	17.5 ~ 17.5	10.84
	4	17.0 ~ 17.8	19.59
	5	17.0 ~ 17.8	29.40



Fig. 5 Settling column used in settling tests

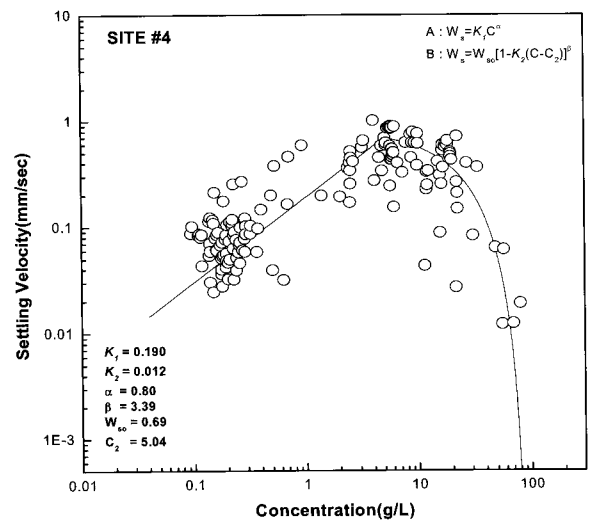


Fig. 6 Settling velocity profile for cohesive sediments from Site #4

발생하였을 것으로 추정된다.

응집침강 영역에서 부유사 입자는 농도가 증가함에 따라 입자 상호간의 충돌로 인한 입자간의 결합률이 향상되어 그 침강속도는 증가하게 되며, 간섭침강 영역에서는 고농도로 인한 격자망(Network) 형태의 토사입자 덩어리들이 공극수(Interstitial water)의 상승이동을 저지하여 침강속도는 감소하게 된다(Kynch, 1952).

응집침강과 간섭침강 영역에서의 침강속도에 대한 전형적인 표현식은 Krone(1962) 식과 Kynch(1952) 식으로, 그 각각은 식 (1)과 (2)에 주어진다.

$$W_s = k_1 C^a \tag{1}$$

$$W_s = W_{so} [1 - k_2 (C - C_2)]^\beta \tag{2}$$

여기서 a 와 β 는 각각 Fig. 6의 응집침강영역과 간섭침강영역에서의 곡선의 기울기를 나타내며, k_1 은 퇴적물의 구성성분과 흐름조건에 따라 변화하는 비례상수, W_{so} 는 최대침강속도, C_2 는 침강속도가 최대가 될 때의 부유사 농도를 나타낸다. 또한 비례상수 k_2 는 $W_s = 0$ 일 경우에 C_2 에 대한 상대 부유사 농도의 역수를 의미한다(Hwang, 1989). Krone 식과 Kynch 식에 대한 자세한 사항은 황규남(2000)에 의해 주어진다. 그림에 도식된 바와 같이, 한강 하구역 정점 #4 퇴적물의 경우에 최소자승접합법으로 구한 $k_1, k_2, a, \beta, W_{so}, C_2$ 는 각각 0.190, 0.012, 0.80, 3.39 0.69, 5.04인 것으로 나타났다. 한편, 침강속도 W_s 와 부유사 농도 C 는 각각 mm/s와 g/L 단위로 주어진다.

5. 침강특성의 지역적 변화

한강 하구역 점착성 퇴적물의 침강속도의 지역적 변화(Local variation)를 분석하기 위하여, 하구역 내의 5개 정점에서 채취된 각 퇴적물 시료의 침강속도곡선들이 Fig. 7에 모두 함께 도식된다. 우선, 그림으로부터 각 정점별 퇴적물의 침강속도 곡선들이 전 농도구역에 걸쳐 대체적으로 유사한 침강속도 분포를 갖는 것을 쉽게 알 수 있다. 그러나, 자세히 살펴보면, 정량적으로 비록 작은 차이이기는 하나, 특히 응집침강영역에서, 정점 #4와 #5 퇴적물의 침강속도가 다른 3개 정점 퇴적물의 침강속도와 상대적으로 상이한 값을 가짐을 알 수 있다. 구체적으로, 간섭침강영역에서는 5개 정점 모두가 거의 동일한 침강속도 분포를 가지나, 응집침강영역에서는 정점 #5 퇴적물이 다른 3개 정점 퇴적물보다 상대적으로 큰 침강속도를 가지며, 정점 #4 퇴적물은 상대적으로 작은 침강속도를 갖는다.

이러한 침강속도의 지역적 변화를 퇴적물 자체의 물리·화학적 특성과 연계하여 해석하기 위하여, 5개 정점 퇴적물 시료에 대해 수행된 물리·화학적 특성 실험 결과들이 정점별로 요약되어 Table 6에 주어진다. 우선 평균입경을 살펴보면, 정점 #5 퇴적물의 평균입경이 17 μ m로 가장 작고, 정점 #4 퇴

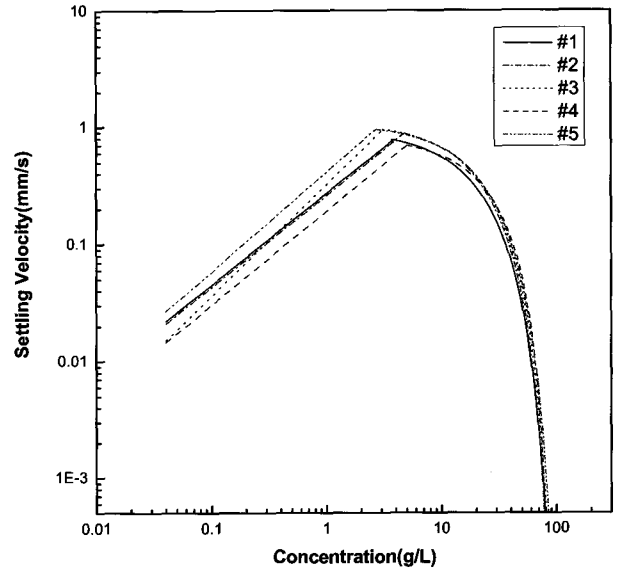


Fig. 7 Local variation of the settling velocity profile within Han estuary

Table 6 Local variation of physico-chemical properties of cohesive sediments within Han estuary

Item	#1	#2	#3	#4	#5
Grain size	21 μ m	37 μ m	24 μ m	39 μ m	17 μ m
Organic content	3%	3%	3%	2%	4%
Mineral matter	Similar for all sediments				

적물은 39 μ m로 가장 크며, 나머지 3개 정점 퇴적물은 그 사이에 속한다. 반면에 유기물 함량은 정점 #5 퇴적물이 4%로 가장 크고, 정점 #4는 2%로 가장 작으며, 나머지 3개 정점은 모두 3%로 동일하다. 광물질 구성성분의 경우, 5개 정점에서 모두 동일한 것으로 판단되므로, 이에 대한 더 이상의 논의는 생략된다.

일반적으로 평균입경이 작을수록 점착력이 증가하는 경향이 있고, 유기물 함량이 많을수록 점착력이 증가한다. 따라서, 이러한 사실을 바탕으로 하면 평균입경이 상대적으로 가장 작고, 유기물함량이 가장 큰 정점 #5 퇴적물이 가장 큰 점착력을 가지며, 반면에 정점 #4 퇴적물이 가장 작은 점착력을 갖는다고 할 수 있다. 퇴적물의 점착력이 크다는 것은 부유토사의 입자간의 응집 효과가 크다는 것을 의미한다. 응집이 잘 일어날수록 응집침강영역에서의 침강속도는 증가하며, 반대로 응집률이 작을수록 침강속도는 감소하므로, 점착력이 가장 큰 정점 #5 퇴적물이 응집침강영역에서 가장 큰 침강속도 값을 가지며 점착력이 가장 작은 정점 #4 퇴적물이 가장 작은 침강속도 값을 가지는 것은 이론적으로 타당한 결과라고 할 수 있다.

6. 침강특성의 공간적 변화

6.1 한강 하구역 퇴적물과 타 지역 퇴적물과의 침강특성 비교

앞서 논의된 바와 같이 한강 하구역 퇴적물의 침강속도는 정점별로 차이를 보이기는 하나, 그 정량적 크기는 미미하다 할 수 있으므로, 총 5개 퇴적물 시료의 침강속도 분석 결과 자료를 모두 통합하여 침강속도곡선이 새로이 산정되었으며, 그 결과는 그림 Fig. 8에 도시된다. Fig. 8에 주어진 결과는 Fig. 7의 정점별 침강속도곡선 산정 결과와 더불어, 퇴적물이 동 예측을 위한 수치모형의 적용시에 사용자의 판단에 따라 편의적으로 사용될 수 있을 것이다. 예측모형 사용자가 한강 하구역 내에서의 퇴적물 분포를 세분화하여 퇴적물의 특성에 따른 지역적 변화를 고려할 경우에는 Fig. 7의 정점별 침강속도 산정결과가 사용되어야만 하나, 앞서 논의된 바와 같이 한강 하구역 내에서의 지역적 변화는 그다지 크지 않은 것으로 판단되므로, 편의적으로 지역적 변화를 무시하고 Fig. 8에 주어진 결과를 퇴적물 이동 수치모형에 적용하여도 무방할 것으로 판단된다.

Fig. 8에 주어진 통합된 침강속도곡선을 사용하면서, 한강 하구역 퇴적물에 대한 본 실험결과와 과거 타 지역 점착성 퇴적물에 대한 실험결과와 비교·검토되었으며, 또한 이를 통하여 점착성 퇴적물의 침강특성의 공간적 변화에 대한 정성적 분석이 수행되었다. 점착성 퇴적물 침강특성의 공간적 변화 분석에 대한 연구로서, 최근 류홍렬 등(2006)은 금강 하구역 점착성 퇴적물의 침강속도 실험 결과와 새만금(황규남 등, 2002), 영국 Severn하구언(Mehta, 1986), 미국 Tampa만(Ross, 1988), 및 미국 Okeechobee호(Hwang, 1989) 점착성 퇴적물들에 대한 침강속도 실험 결과를 비교·분석한 바 있다. 본 연구에서는 류홍렬 등(2006)의 분석결과에 본 연구를 통하여 도출된 한강 하구역 침강속도 실험 결과를 추가하여 점착성 퇴

적물 침강특성의 지역적 변화를 재분석하였다. 한강 하구역 점착성 퇴적물에 대한 본 침강속도곡선 산정결과와함께 과거 타 지역 퇴적물에 대한 침강속도곡선 산정결과는 Fig. 9에 주어진다. 그림으로부터 쉽게 알 수 있듯이, 각 침강속도 곡선은 주어진 부유사 농도 값에 대해 정량적으로 상당히 다른 침강속도 값을 갖는다. 농도의 증가와 함께 침강속도가 증가하는 응집침강 영역(혹은 저농도 구간 : $C < 3 \text{ g/L}$)에서 한강 하구역 퇴적물의 침강속도는 평균적으로 새만금 퇴적물의 침강속도보다 10배 정도 크고, 금강 하구역 퇴적물보다는 약 2배 정도 큰 반면에, Okeechobee호와 Severn하구언 퇴적물 보다는 약 3배 정도 작다. 한편, 중농도 구간($3 < C < 20 \text{ g/L}$)에서는 한강 하구역 퇴적물의 침강속도가 새만금 퇴적물의 침강속도보다는 작아지고, Okeechobee호의 퇴적물 보다는 오히려 커지며, Severn하구언보다는 계속해서 작은 값을 갖는다.

고농도 구간($C > 20 \text{ g/L}$)인 경우에는 Okeechobee호 퇴적물이 가장 작은 값을, 그리고 한강 및 금강 하구역과 새만금 퇴적물의 침강속도가 그 다음으로 가장 작은 값을 가지며, Severn하구언 퇴적물이 여전히 가장 큰 침강속도 값을 가진다. 또한, Okeechobee호 및 Tampa만 퇴적물의 경우에 최대 침강속도는 부유사 농도 값이 약 $1 \sim 2 \text{ g/L}$ 일 때 발생하고, 한강 하구역 및 금강 하구역과 Severn하구언의 퇴적물은 $3 \sim 5 \text{ g/L}$ 에서 최대 침강속도를 가지며, 새만금 퇴적물의 경우에는 비교적 그 차이가 큰 약 16 g/L 의 부유사 농도 값에서 최대침강속도를 갖는다.

황규남 등(2002)과 류홍렬 등(2006)에 의해 분석된 바와 같이 정량적인 측면에서의 침강속도 크기의 이러한 현저한 차이가 의미하는 바는 점착성 퇴적물의 경우에 그 침강특성은 퇴적물 자체의 물리·화학적 기본특성에 따라 공간적으로 크게 변화할 수 있다는 것이다. 이러한 사실은 타 지역 퇴적물의 침강속도 자료는 특정 지역에서의 점착성 퇴적물의 이동 예측을 위한 수치모형실험을 위해 사용될 수 없다는 것을 나타내며, 침강속도 산출을 위한 현장관측이나 실내실험이 각 조사대상 지역에서 반복적으로 수행되어야 한다는 것을 의미한다.

6.2 물리·화학적 특성이 퇴적물의 침강특성에 미치는 영향

본 연구에서는 침강속도 특성의 지역적 변화에 대한 해석시와 마찬가지로 공간적 변화의 원인 또한 퇴적물 자체의 물리·화학적 특성과 연계하여 정성적으로 분석되었다. 앞서 Fig. 9에 제시된 총 5개의 타 지역 퇴적물에 대한 침강속도 산정 사례들 중에 퇴적물 자체의 물리·화학적 기본특성이 함께 조사된 경우는 금강 하구역, 새만금 및 Okeechobee호 퇴적물에 대한 경우뿐이다. 따라서, 본 연구에서는 이 퇴적물들과 한강 하구역 퇴적물간의 침강특성의 정량적 차이에 대해 각 퇴적물의 물리·화학적 특성들과 연계된 정성적 분석이 수행되었다. 한강 및 금강 하구역 그리고 새만금 및 Okeechobee호 퇴적물의 물리·화학적 특성은 Table 7에서 비교되며, 4개 지역 퇴적물에 대한 침강속도곡선은 Fig. 10에 주어진다.

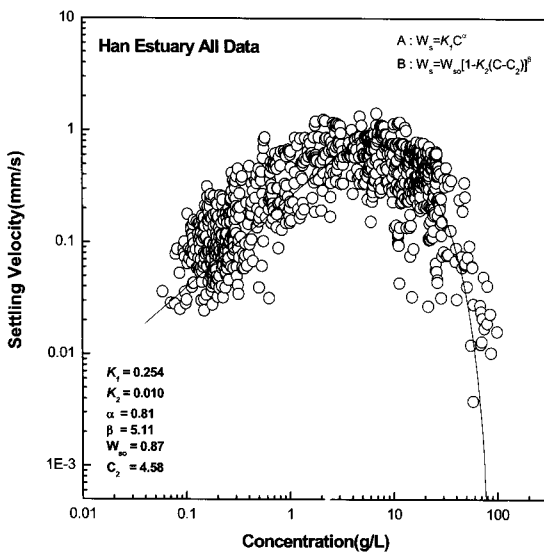


Fig. 8 Settling velocity profile determined by using all settling test results

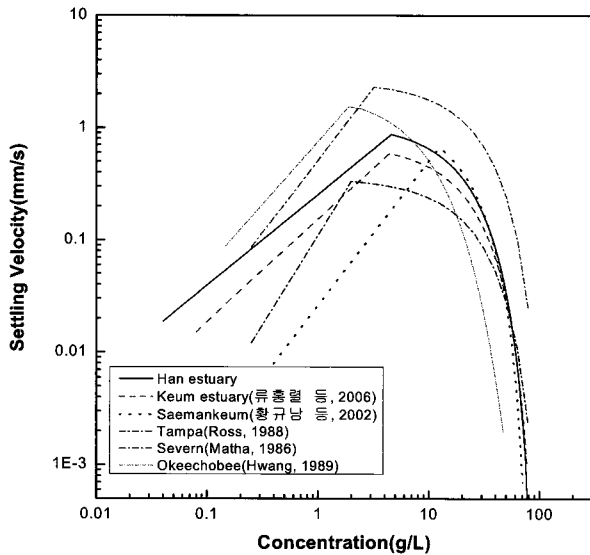


Fig. 9 Comparison of settling velocity profile for cohesive sediments from Han estuary with other regions

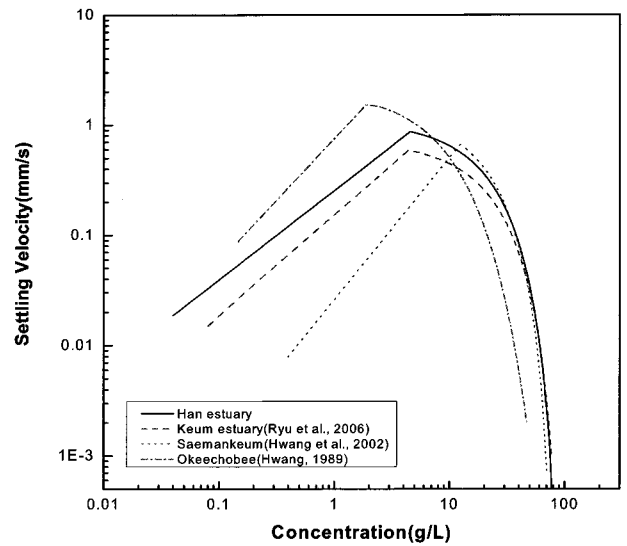


Fig. 10 Comparison of the settling velocity profile for the sediment from Han estuary with those from other regions

Table 7 Comparison of the physico-chemical properties of sediment from Han estuary with other regions

Item	Han estuary	Keum estuary	Saemankeum	Lake Okeechobee
Grain size	28 μ m	32 μ m	52 μ m	15 μ m
Mineral matter	Quartz	Quartz	Quartz	Kaolinite
Organic content	3%	3%	2%	40%

Table 7에서 알 수 있듯이 평균입경은 새만금 퇴적물이 52 μ m으로 가장 크고, 그 다음으로 금강 하구역, 한강 하구역 퇴적물 순으로 크며, Okeechobee호 퇴적물이 15 μ m으로 가장 작다. 역으로 유기물 함량은 Okeechobee호 퇴적물이 40%로 가장 크고, 새만금 퇴적물이 2%로 가장 작으며, 금강 및 한강 하구역 퇴적물이 3%로 비록 새만금 퇴적물과 작은 차이이기는 하나 그 중간에 위치한다. 한편, 광물질 구성성분에서는 금강 하구역과 새만금 퇴적물이 한강 하구역 퇴적물과 동일하게 석영이 주된 광물질로 구성되어 있으며, 예외적으로 Okeechobee호 퇴적물만이 고령토가 주된 광물질 성분이다.

앞서 설명된 바와 같이 일반적으로 점착성 퇴적물은 평균 입경이 작을수록, 그리고 유기물 함량이 클수록 점착력이 증가하는 경향이 있으며, 또한 광물학적 측면에서 보면, 보편적으로 점착성 퇴적물에 많이 함유되어 있는 고령토, 일라이트, 녹니석 등의 광물성 점토들이 석영과 같은 비점토성 광물보다 훨씬 더 큰 점착력을 갖는다. 따라서, 이에 따르면, Fig. 10에 제시된 총 4개 퇴적물 중에 Okeechobee호 퇴적물이 점착력에 의한 침강효과가 가장 크고, 그 다음으로 한강 하구역, 금강 하구역 퇴적물 순으로 크며, 새만금 퇴적물이 점착력에 의한 침강효과가 가장 작을 것으로 추정된다.

이러한 해석은 각 퇴적물별로 응집침강 영역과 간섭침강 영역에서의 침강속도를 정량적으로 비교할 때에 그 타당성을

갖는다. 퇴적물의 점착력이 크다는 것은 부유토사 입자간의 응집력이 크다는 것을 의미하므로, 응집 효과에 의한 침강속도의 증가가 지배적인 응집침강 영역에서 점착력의 상대적 크기 순서대로 Okeechobee 퇴적물이 가장 큰 침강속도를 가지고, 그 다음으로 한강 하구역, 금강 하구역 순으로 침강속도가 크며, 점착력이 상대적으로 가장 작은 새만금 퇴적물이 가장 작은 침강속도를 갖게 되었다고 해석될 수 있다(Fig. 10 참조). 반면에 고농도시에 토사입자간의 응집효과가 침강속도를 감소시키는 간섭침강 영역에서는 점착력이 가장 큰 Okeechobee호 퇴적물이 가장 작은 침강속도를 갖는 결과가 초래되었다고 설명될 수 있다.

한강 하구역 퇴적물의 침강속도는 응집침강 영역에서는군산 및 새만금 해역보다는 크고, Okeechobee호 퇴적물의 침강속도 보다는 작은 값을 가지며, 간섭침강영역의 초기부분에서는 역시 Okeechobee호 퇴적물 보다는 작은 값을 가지다가 부유사 농도가 약 30g/L 이상인 고농도영역에서는 새만금 및 금강 하구역 퇴적물과 거의 동일한 값을 갖는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 물리·화학적 특성 중 평균입경면에서 한강 하구역 퇴적물의 평균입경이 Okeechobee호 퇴적물 보다 크고 금강 하구역과 새만금 퇴적물보다는 작은 값을 가지므로 이론적으로 타당한 결과이며, 유기물 함량 및 광물질 구성 성분면에서는 한강 하구역, 금강 하구역, 새만금 퇴적물의 유기물 함량과 광

물질 주요 구성 성분이 유사한 것으로 볼 때 물리·화학적 특성 중 입경분포가 침강속도에 미치는 영향이 유기물 함량과 광물질 구성성분보다는 더 큰 것으로 여겨진다.

7. 결 론

본 연구에서는 한강 하구역 점착성 퇴적물의 침강속도를 실내 실험을 통하여 정량적으로 산정하였으며, 산정된 침강속도의 지엽적·공간적 변화를 퇴적물의 물리·화학적 특성과 연계하여 분석하였다. 물리·화학적 특성 항목으로 입경분포, 유기물 함량, 광물질 구성 성분이 조사되었는데, 그 결과 평균입경은 $17\mu\text{m} \sim 39\mu\text{m}$ 의 범위에서 정점별로 변화하는 것으로 나타났으나, 유기물 함량은 정점별로 큰 차이 없이 평균적으로 3%의 값을 갖는 것으로 나타났다. 광물질 구성성분 역시 석영(Quartz)이 주성분으로 모든 정점에서 거의 동일한 것으로 분석되었다.

한강 하구역 점착성 퇴적물에 대한 침강속도 산정결과는 전형적인 점착성 퇴적물의 침강특성인 응집침강영역과 간섭침강영역을 명확히 보여주었으며, 모든 퇴적물 시료에 대해 부유사 농도값이 $0.1 < C < 80 \text{ g/L}$ 인 구간에서 $0.01 < W_s < 1.5 \text{ mm/sec}$ 사이의 침강속도 값을 갖는 것으로 나타났다. 침강속도는 정점별로 차이를 보이긴 하였으나, 지엽적(local) 변화를 무시하여도 무방할 정도로 그 정량적 크기는 미미한 것으로 해석되었으며, 각 정점별 최대 침강속도 (W_{s0})는 $2.76 \sim 5.04 \text{ g/L}$ 의 농도 구역에서 $0.69 \sim 1.09 \text{ mm/s}$ 의 크기를 가지는 것으로 나타났다. 또한 본 연구에서는 한강 하구역 점착성 퇴적물 침강속도와 타 지역 퇴적물에 대한 침강속도와 비교·검토를 통하여, 점착성 퇴적물 침강특성의 공간적 변화 특성이 재확인되었는데, 그 차이는 정량적으로 매우 큰 것으로 나타났다. 특히 한강 하구역 점착성 퇴적물의 침강속도는 금강 하구역 및 새만금 퇴적물보다는 크며, 미국 Okeechobee 호 퇴적물보다는 작은 것으로 나타났다. 한편, 물리·화학적 특성과 연계한 각 퇴적물별 침강속도의 비교·분석에서는 퇴적물의 물리·화학적 특성 중 입경분포 특성이 유기물 함량과 광물질 구성성분보다는 침강특성에 미치는 영향이 더 큰 것으로 나타났다.

본 연구에서 도출되어진 한강 하구역 점착성 퇴적물 침강속도의 정량적 결과는 향후 한강 하구역에 대한 체계적 관리 및 기능 회복을 위한 기술 개발시 크게 활용될 수 있을 뿐만 아니라, 저면의 침식과 퇴적에 따른 하상변동 해석, 수질 및

퇴적물 오염 저감을 위한 대책방안 수립 등 다양한 목적으로 크게 활용될 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 한국해양연구원 연구사업인 하구역 관리 및 기능회복 기술 개발(PE97701)의 일환으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- 국립수산진흥원 (1997). 해양환경공정시험방법, 한국해양학회.
 류홍렬, 천민철, 황규남 (2006). "금강 하구역 미세-점착성 퇴적물의 침강특성에 관한 연구", 한국해양안·해양공학회지, 제18권, 제3호, pp 251-261.
 황규남 (2000). "새만금 갯벌 퇴적물의 침강속도 산정을 위한 실험적 연구", 대한토목학회논문집, 제20권, 제2-B호, pp 277-286.
 황규남, 조용식, 이태환 (2002). "새만금 미세점착성 퇴적물의 침강특성: 퇴적물의 물리·화학적 특성의 영향", 한국수자원학회논문집, 제35권, 제3호, pp 475-484.
 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.
 Kynch, G.J. (1952). "A Theory of Sedimentation", Transactions of the Faraday Society, Vol 48, pp 166-176.
 Mehta, A.J. (1986). Characterization of Cohesive Sediment Properties and Transport Processes in Estuaries, Estuarine Cohesive Sediment Dynamics, A.J. Mehta ed., Springer-Verlag, Berlin, pp 290-325.
 Ross, M.A. (1988). Cohesive Sediments in Estuarine Environment. Ph.D. Dissertation, Univ. of Florida, Gainesville, FL.
 Hwang, K.N. (1989). Erodibility of Fine Sediment in Wave-dominant Environments, Master's Thesis, University of Florida.

2007년 12월 17일 원고 접수

2008년 2월 11일 최종 수정본 채택