

금강 하구역 미세-점착성 퇴적물의 침강특성에 관한 연구 A Study on Settling Properties of Fine-Cohesive Sediments in Keum Estuary

류홍렬* · 천민철** · 황규남***

Hong-Ryul Ryu*, Min-Chul Chun** and Kyu-Nam Hwang***

요 지 : 본 연구의 목적은 금강 하구역 미세-점착성 퇴적물의 침강속도를 정량적으로 산정하고, 그 침강특성의 금강 하구 내에서의 지엽적 변화 및 계절적 변화와 타 지역 침강속도 결과와의 비교/분석을 통한 공간적 변화를 해석하는데 있다. 또한 실험분석을 통하여 점착성 퇴적물의 물리·화학적 특성 즉, 입경분포, 유기물함량, 광물질구성 등의 공간적 변화를 정량적으로 조사한 후, 이러한 특성들과 침강속도간의 상관관계 및 침강속도의 정량적 변화에 미치는 영향에 대해서도 해석하였다. 침강실험의 결과로서, 금강 하구역 미세-점착성 퇴적물은 부유사 농도 값이 $0.1 < C < 80 \text{ g/L}$ 에서 $0.01 < W_s < 1 \text{ mm/sec}$ 의 침강속도 값을 갖는 것으로 확인되었으며, 산정된 침강속도는 다른 지역(새만금, Tampa만, Severn하구, Okeechobee호)과 비교해 정량적으로 상당한 차이를 보였으나 금강 하구역 내에서의 지엽적 변화 및 계절적 변화는 미미한 것으로 나타났다.

핵심용어 : 미세-점착성 퇴적물, 침강속도, 침강실험, 물리화학적 특성

Abstract : The purpose of this study is to quantitatively estimate the settling property for fine-cohesive sediments in Keum Estuary and to evaluate the spatial variation by analyzing and comparing the local and seasonal variation of the settling properties in Keum Estuary with that of the settling properties in the other sites. After the spatial variation of physico-chemical properties such grain size distribution, the percentage of organic contents, mineralogical composition etc is investigated through experiments and analyses, interrelation between the physico-chemical properties and settling velocities and effect that the physico-chemical properties have on the quantitative variation of settling velocities were also analyzed in this study. Experimental results of settling tests shows that settling velocities of Keum Estuary mud vary in the range of two orders of magnitude (from 0.01 to 1 mm/sec) over the corresponding concentration range of 0.1 to 80 g/L, and a feature of settling velocity profile is quite different in quantity as compared to those of previous studies with mud of other regions: Saemankuem, Tampa Bay, Severn Estuary and lake Okeechobee. However, their local and seasonal variabilities within Keum Estuary appear to be insignificant.

Keywords : fine-cohesive sediments, settling velocity, settling test, physico-chemical properties

1. 서 론

하구역의 인위적인 개발은 준평형 상태로 유지되고 있는 하구에서의 물리·생태학적 역학관계를 파괴하게 되며, 그로 인하여 경제적, 환경적 및 안정성 측면에서 많은 문제점들이 파생될 수 있다는 것은 이미 잘 알려진 사실이

다. 주로 하구역에 널리 분포되어 있는 미세-점착성 퇴적물과 관련하여 발생하는 문제점들은 크게 두 종류로 분류될 수 있다. 그 첫째는 저면 퇴적물이 침식 후 이동되어 퇴적하는 과정에서 발생하는 제반 퇴적물 이동역학과 관련된 문제들로, 파다 침식 혹은 파다 퇴적으로 인하여 발생하는 해안침식 및 항로매몰 현상 등이 그 대표적인 예라 할 수

*전북대학교 토목공학과(Dept. of Civil Eng., Chonbuk National Univ, Jeonbuk 561-756, Korea)

**항도 엔지니어링(Hangdo ENG, Seoul 152-050, Korea)

***전북대학교 토목공학과 · 공업기술연구소(Corresponding author: Kyu-Nam Hwang, Dept. of Civil Eng. & RICT, Chonbuk National Univ, Jeonbuk 561-756, Korea. khwang@chonbuk.ac.kr)

있다. 두 번째는 수질(water quality)과 저면 경계층(benthic boundary)과 관련된 문제들이다. 예를 들어, 높은 탁도는 태양 빛의 투과능을 저하시키고, 결과적으로 수층 내 생태계에 큰 영향을 미쳐 생물학적 생산성을 저하시킬 수 있다. 더욱이, 미세-점착성 퇴적물은 부유 혹은 용해상태의 여러 가지의 독성을 가진 오염물질과 쉽게 결합하는 경향이 있어, 하구에서의 수질 오염의 주 요인이 된다. 특히 서해연안 대부분에 분포되어있는 미세-점착성 퇴적물은 사실상 퇴적물과는 달리 강한 점착성을 가지고 있어 여러 가지 독성 오염물질과 쉽게 결합, 퇴적되어 해수 오염의 주된 원인이 되며, 또한 토사입자의 침강속도가 매우 작아 파랑, 조류 등과 같은 해수유동에 의해 쉽게 멀리 이동할 수 있어 점착성 퇴적물의 침식/퇴적에 의한 피해 가능지역은 상당히 광범위하다고 할 수 있다(Hwang and Mehta, 1989).

금강 하구역은 1988년에 금강 하구둑이 건설된 후 퇴적물의 대규모 퇴적으로 인한 내항 수역의 매몰을 우려하여 외항 박거의 외해 쪽에 남·북측도류제와 안벽을 건설하는 군장 신항만 계획(군산항건설사무소, 1989)이 수립되었으며, 이후 새만금 간척사업, 군산-장항지구 국가공단조성사업, 군산 신외항 건설 및 군산 해상 도시건설 등 대규모 공사가 완료되었거나 아직 수행 중에 있다. 그러나 금강 하구둑 건설이후 해역 내 해수유동의 변화를 가져와 대규모의 퇴적으로 인한 항로 매몰 문제가 심각하게 대두되고 있는 실정이다. 그러나 대규모의 퇴적을 일으키는 퇴적물의 이동 특성에 관한 연구는 아직 초기단계에 있으며 관련연구로써 퇴적물의 침강속도 산정은 시급한 선결과제이다.

대부분의 경우에 하구의 미세-점착성 퇴적물은 보통 무기성 광물(inorganic mineral), 유기물(organic material) 및 생화학물(biochemicals)의 혼합체이며, 광물 입자들은 주로 점토와 실트로 구성되어 있다. 이러한 혼합체의 퇴적 혹은 침강특성은 입자간의 응집 현상에 의해 크게 영향을 받으며, 그 응집강도는 또한 광물질 구성, 양이온 전도율, 입경 분포, 유기물 함량 등으로 묘사되는 물리·화학적 기본특성에 따라 크게 변화한다(Mehta, 1986). 따라서 부유 입자에 부여되는 수동학적 조건이 동일하다 하더라도, 퇴적물 자체의 특성에 따라 그 퇴적 혹은 침강특성은 달라지게되며, 이러한 "site-specific"한 특성으로 인하여 미세점착성 퇴적물의 침강속도에 대한 이론적 해는 현재 없으며 현장이나 실험실 실험을 통하여 측정하는 것이 최선이다.

본 연구에서는 금강 하구역내 미세-점착성 퇴적물의 표본채취, 현장관측 및 실내실험을 통하여 금강 하구역 미세-점착성 퇴적물의 침강속도를 정량적으로 산정하여 금강 하

구역내에서의 지역적 변화(local variation)와 계절적 변화(seasonal variation) 및 타 지역 침강속도 결과와의 비교/분석을 통한 공간적(spatial) 변화를 해석하였다. 또한 실험분석을 통하여 점착성 퇴적물의 물리·화학적 특성(입경분포, 유기물 함량, 광물질 구성)의 공간적 변화를 정량적으로 조사한 후, 이러한 특성들과 침강속도간의 상관관계 및 침강속도의 정량적 변화에 미치는 영향에 대해 해석하였다.

2. 현장 표본 채취

금강 하구역 미세-점착성 퇴적물의 물리·화학적 특성 및 침강특성의 지역적 변화 분석을 위한 퇴적물 표본시료는 추계시 4개 지점에서 채취되었다. 또한 계절적 변화 분석을 위한 퇴적물 표본시료는 지점 #2에서 하계, 추계, 동계시 3회에 걸쳐 시료가 채취가 이루어졌고 지점 #1에서는 추계와 동계시 2회에 걸쳐 시료채취가 이루어졌다. 표본시료는 채니기(Grab sampler)로 채취되었으며, 현장 해수의 조건을 반영하기 위하여 동일 지점에서 해수를 채취하여 침강실험의 전 과정에 사용하였다. 각 퇴적물 표본시료의 채취 위치와 경위도 좌표는 Fig. 1과 Table 1에 주어지며, 채취 당시의 수온, 염도 및 수심 관측값들 또한 지점별로 Table 1에 주어진다.

3. 물리·화학적 특성 실험

금강 하구역 4개 지점에서 채취된 총 7종류의 퇴적물 표본시료에 대해서 물리·화학적 특성 조사를 위한 실험이 수행되었다. 수행된 실험은 입경분포, 유기물 함량, 광물질 구성에 대한 조사로 광물질 구성에 대한 분석은 정성적 분석만을 수행하였으며 도출된 결과들은 침강속도의 지역적

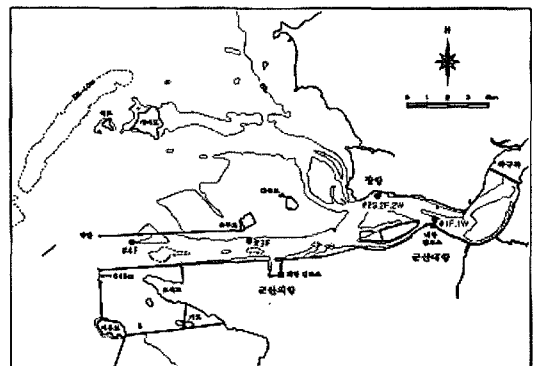


Fig. 1. Extraction location of sediment sample in Keum Estuary.

Table 1. Basic information of sampling sites

Site No.	일자	N	E	수온 (°C)	염도 (‰)	수심 (m)	비고
1F	2001. 11. 20(Fall)	35°59'30	126°42'42	9	18.8	2.5	소조기, 건조 3시간전
1W	2002. 2. 8(Winter)	35°59'30	126°42'42	4.6	24.9	3.5	소조기, 만조 2시간전
2S	2001. 8. 12(Summer)	36°00'19	126°40'48	26.5	9.8	3.0	소조기, 건조 1시간후
2F	2001. 11. 20(Fall)	36°00'19	126°40'48	11	21.2	5.0	소조기, 건조 3시간후
2W	2002. 2. 8(Winter)	36°00'19	126°40'48	4.5	28.5	5.0	소조기, 만조 1시간후
3F	2001. 11. 20(Fall)	35°58'49	126°36'24	11	21.4	4.0	소조기, 건조 30분전
4F	2001. 11. 20(Fall)	35°58'56	126°33'17	11	23.3	1.2	소조기, 건조 40분후

계절적 변화 분석 및 과거 타 지역 연구결과와의 비교를 통한 공간적 변화분석시 사용된다.

3.1 입경분포

입경분포 분석은 ASTM(American Society for Testing and materials, 1987)이 제시한 방법에 따라 수행되었으며 입경분포 분석에 대한 자세한 사항은 황규남 등(2002)에 주어진다. Fig. 2에서 알 수 있듯이 지점별 입경분포 변화는 1F, 2F, 3F 퇴적물의 경우 비교적 유사한 값을 가지나 4F 퇴적물의 경우 다른 세 지점보다 좀더 조립질의 분포를 가지는 것으로 나타났으며, 지점 #1에서의 계절적 변동에 따른 입경분포 변화는 1W 퇴적물이 1F 퇴적물에 비해 세립의 입자를 더 많이 포함하고 있는 것으로 나타났다. 또한 지점 #2에서의 계절적 변동에 따른 입경분포 변화는 여름(2S)보다는 가을(2F) 및 겨울(2W)에 더 세립질의 분포를 갖는 것으로 나타났으며, 이는 하계시 강우량의 증가로 인하여 금강하구둑을 통한 방류량 및 방류 빈도의 증가로부터 비롯되었다고 여겨진다.

금강 하구역 총 7개 퇴적물 시료 중 2S와 4F 퇴적물 시

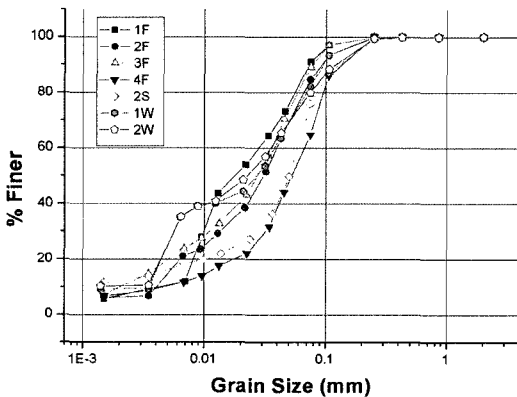


Fig. 2. Change in the grain size distribution of fine-cohesive sediments in Keum Estuary.

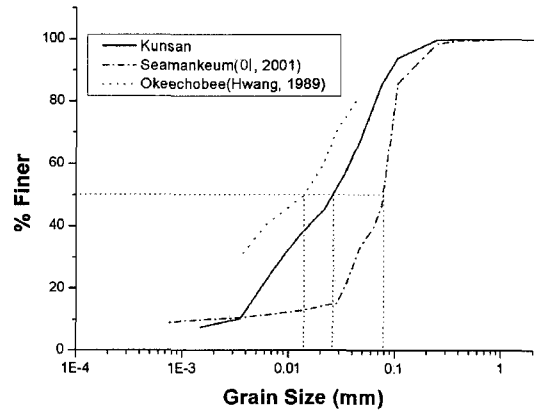


Fig. 3. Comparison to grain size distribution between fine-cohesive sediments in Keum estuary and other regions.

료의 입경분포 결과가 서로 유사한 입경분포를 가지는 다른 5개 퇴적물 시료와는 달리 좀더 조립질의 분포를 가지는 것으로 나타났다. 따라서 이 두 퇴적물 시료를 제외한 5개 퇴적물 시료의 입경분포 분석결과를 통합하여 평균한 입경분포가 결정되었으며, 이 결과를 이용하여 과거 타 지역 퇴적물의 입경분포 분석결과와 비교하였다. Fig. 3에 보여지는 바와 같이 평균된 금강 하구역 퇴적물의 입경분포는 Okeechobee호 퇴적물보다 세립의 분포를 나타내며, 새만금 퇴적물보다는 훨씬 더 조립의 분포를 가지는 것으로 나타났다.

3.2 유기물 함량

본 연구에서 유기물 함량은 해양환경공정시험방법(국립수산진흥원, 1997)에 따른 강열감량법에 의해 수행되었으며 실험 방법 등에 대한 자세한 설명은 황규남 등(2002)에 주어진다. 금강 하구역 미세-점착성 퇴적물의 유기물 함량은 지점별로 1.9%에서 최대 4.5%까지 변화함을 알 수 있었으며 유기물함량도 입경분포와 마찬가지로 지점별 변화는 그다지 크지 않은 것으로 나타났다. 이에 금강 하구역

Table 2. Comparison of organism content for fine-cohesive sediments

지역	유기물 함량(%)	평균(%)
금강 하구역	1.9~4.5	3.15
새만금(이, 2001)	0.8~2.8	1.9
Okeechobee호 (Hwang and Mehta, 1989)	36~43	40

미세-점착성 퇴적물은 평균적으로 약 3.15% 정도의 유기물을 함유하고 있다고 할 수 있으며 이 결과와 타 지역에서의 결과들(이재연, 2001; Hwang and Mehta, 1989)이 Table 2에 주어진다. 금강 하구역 퇴적물 시료에 대한 유기물 함량은 3.15%로 새만금 해역 퇴적물과 유사하게 그 함량은 미미한 것으로 나타났으나, 유기물 함량이 40%인 Okeechobee호와는 약 13배 정도의 차이가 있음을 알 수 있다.

3.3 광물질 구성 성분

광물질 구성 성분은 전북대학교 공동시험소가 보유하고 있는 RIGAKU사 D/MAX-A 회절분석기(x-ray diffraction)를 이용하여 정성적 분석이 수행되었다. 자원연구소 지원하에 수행된 x-ray diffractogram의 정성적 분석결과에 따르면, 전체적으로 모든 퇴적물에 대한 광물질 구성은 지점별로 변화가 거의 없이 유사한 분포양상을 보이는 것으로 나타났으며 분석 결과는 과거 금강 하구역(Choi, 1981) 및 타 지역에서의 결과들(이재연, 2001; Hwang and Mehta, 1989)과 함께 Table 3에 주어진다. 과거 금강 하구역 퇴적물에 대한 Choi(1981)의 분석결과는 석영 및 장석 등을 제외한 순수 점토 광물만을 분석한 것으로서 금강 하구역 퇴적물에 대한 본 분석결과와 거의 비슷한 구성을 갖는다고 할 수 있고, 이재연(2001)에 의한 새만금 퇴적물 분석결과와도 거의 동일함을 알 수 있다. 한편, Okeechobee호 점착성 퇴적물의 광물질 구성성분(Hwang, 1989)은 금강 하구역이나 새만금의 경우와는 달리 고령토가 지배적인 구성성분임을 알 수 있다.

4. 침강실험

침강실험은 특수 제작된 침강수주(settling column)를 이용하여 multi-depth 부유사 농도 채취방법으로 수행되었으며, 각 부유사 농도에서의 침강속도는 침강수주에서의 시간과 높이에 따른 농도변화 측정값들에 Ross(1988)가 개발한 침강속도 산정 수치프로그램을 적용하여 결정되었다. 침강수주의 단면도, 침강실험 과정 및 Ross(1988)의 수치모형을 이용한 침강속도 산정방법 등에 대한 자세한 사항은 황규남(2000)에 주어진다.

본 연구의 목적이 미세 점착성 퇴적물의 침강특성 조사이므로 각 지점에서 채취된 퇴적물 시료는 직경이 74 μm 인 No.200체를 사용하여 wet sieving 방법으로 미세 토사 입자만 분리하여 침강실험을 수행하였다. 채취된 총 7종류의 퇴적물 시료를 사용하여 총 30번의 침강실험이 수행되었으며, 각 실험에서의 실험조건들이 Table 4에 주어진다. 각 실험별 수주 내 현탁액의 온도변화는 1°C 내외로서 실험 중의 온도변화는 비교적 작았으나 실험 전제로 볼 때에 현탁액의 온도는 9.0°C에서 25.5°C까지 변화하였다. 이러한 크기의 온도 변화가 점착성 퇴적물의 침강속도에 미치는 영향은 그다지 크지 않은 것으로 알려지고 있다(황규남, 2000). 각 실험에서의 초기 부유사 농도 C_0 값 또한 표 4에 주어지는데 초기부유사 농도는 실험별로 2.22 g/L에서부터 44.24 g/L까지 변화시켰다. 여기서 초기 부유사 농도는 부유사의 농도가 전 수심에 대해 거의 균일하도록 충분히 잘 섞인 시점의 시간, 즉 시간 0에서의 부유사 농도를 나타낸다.

중량분석을 통하여, 침강수주의 각기 다른 높이와 시간에서 채취한 탁수들의 부유사 농도가 측정되었고, 각 실험별로 농도 단면도가 작성되었으며 침강속도는 Ross(1988)가 개발한 수치프로그램에 실험으로부터 구한 농도단면도를 입력값으로 하여 산정하였다. 각 지점별 점착성 퇴적물에 대한 침강속도는 점합곡선의 각 인자값 및 점합곡선의 상관계수 R^2 과 함께 산정되었으며 그중 대표적인 예로써, 2S 퇴적물에 대한 침강속도 산정결과가 Fig. 4에 주어진다. 그림에 제시된 상관계수 R^2 은 응집침강영역의 점합곡선에 대

Table 3. Comparison of constituent component for mineral matters

함량순위	금강 하구	함량순위	과거 금강 하구(choi, 1981)	함량순위	새만금	함량순위	Okeechobee호
1	석영(Quartz)	1	Illite	1	Quartz	1	Kaolinite
2	미사장석(Albite)	2	Kaolinite	2	Feldspal, Albite		
3	Illite	3	Chlorite	3	Illite	기타	Montmorillonite Sepiolite Quartz
4	고령토(Kaolinite) 녹니석(Chlorite)	4	Smectite	4	Kaolinite		
				5	Chlorite		

Table 4. Experimental conditions in settling tests

지점 #	Test No.	Temp. of Suspension(°C)	Variation of Suspension Height(cm)	C ₀ (g/L)
1F	1	9.0 ~ 10.0	177.5 ~ 152.5	11.0
	2	9.5 ~ 10.0	178.0 ~ 152.5	6.9
	3	10.0 ~ 10.5	178.5 ~ 151.5	4.0
	4	11.0 ~ 12.0	178.0 ~ 151.5	9.8
	5	12.0 ~ 13.0	176.5 ~ 150.5	18.3
1W	1	24.0 ~ 24.1	178.5 ~ 154.5	2.2
	2	24.0 ~ 24.1	178.0 ~ 153.5	6.6
	3	24.0 ~ 24.1	178.0 ~ 156.5	10.9
	4	24.0 ~ 24.1	178.0 ~ 154.5	21.3
2S	1	24.3 ~ 25.0	178.0 ~ 144.1	2.6
	2	24.5 ~ 25.0	177.0 ~ 143.8	9.9
	3	24.8 ~ 25.5	177.0 ~ 145.5	25.9
	4	22.5 ~ 23.0	176.3 ~ 153.6	16.2
	5	22.5 ~ 23.8	175.8 ~ 151.3	44.2
2F	1	15.0 ~ 16.0	178.0 ~ 154.5	5.6
	2	16.0 ~ 17.0	178.0 ~ 153.5	12.4
	3	16.0	179.0 ~ 152.5	15.9
	4	16.0	179.0 ~ 152.5	26.1
2W	1	24.0 ~ 24.5	178.0 ~ 155.2	3.5
	2	24.0 ~ 24.1	177.5 ~ 153.5	8.2
	3	22.0 ~ 24.0	177.0 ~ 152.2	12.0
	4	24.0 ~ 24.1	179.0 ~ 155.5	18.9
3F	1	13.5 ~ 15.0	177.2 ~ 152.0	4.5
	2	13.5 ~ 14.0	177.0 ~ 152.0	12.3
	3	14.0 ~ 14.0	178.0 ~ 152.3	17.9
	4	13.0 ~ 14.5	178.0 ~ 155.0	24.7
4F	1	14.5 ~ 15.5	178.0 ~ 152.5	4.9
	2	15.0 ~ 16.0	176.5 ~ 150.5	12.8
	3	14.0 ~ 15.0	178.0 ~ 155.8	16.1
	4	14.0 ~ 14.5	177.5 ~ 152.8	22.6

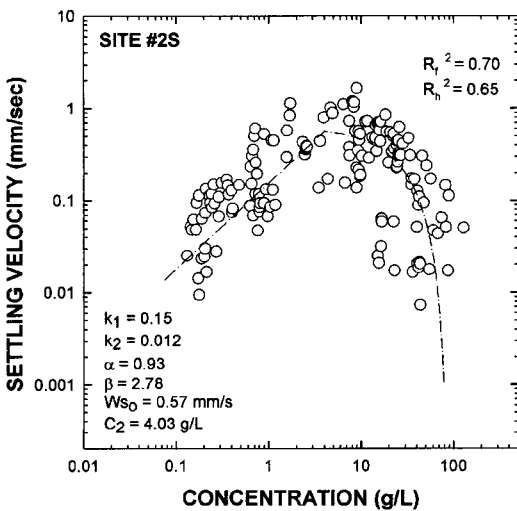


Fig. 4. Settling velocity curve of fine-cohesive sediments on 2S.

한 값이며, R_h^2 은 간섭침강영역의 접합곡선에 대한 값이다. 데이터가 다소 분산되어 있기는 하나, Fig. 4는 부유사 농도가 증가함에 따라 침강속도가 증가하는 응집침강 영역($0.1 < C < 4.03 \text{ g/L}$)과, 역으로 침강속도가 감소하는 간섭침강 영역($4.03 < C < 80 \text{ g/L}$)을 명확히 보여주고 있다.

응집침강과 간섭침강 영역에서의 침강속도에 관한 표현식은 Krone(1962)과 Kynch(1952)식을 사용하였으며, 각각 다음과 같이 주어진다.

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

$$W_s = W_{s0} [1 - k_2 (C - C_2)]^\beta \tag{2}$$

여기서 α 와 β 는 각각 Fig. 4에서 응집침강영역과 간섭침강영역에서의 곡선의 기울기를 나타내며, k_1 은 퇴적물의 구성성분과 흐름조건에 따라 변화하는 비례상수, W_{s0} 는 최대침강속도, C_2 는 침강속도가 최대 일 때의 부유사 농

도, k_2 는 $W_s=0$ 일 경우 C_2 에 대한 상대 부유사 농도의 역수를 의미한다(Hwang, 1989). Krone과 Kynch 식에 대한 자세한 설명은 황규남(2000)에 주어진다. 금강 하구역 2S 퇴적물의 경우, Fig. 4에서 보여지듯이 최소자승접합법으로 구한 $k_1, k_2, \alpha, \beta, W_{s0}, C_2$ 는 각각 0.15, 0.012, 0.93, 2.78, 0.57 mm/s, 4.03 g/L인 것으로 나타났으며 이때의 상관계수 R^2 는 응집침강영역과 간섭침강영역에서 0.70과 0.65이다. 전체적으로 볼 때 금강 하구역 미세-점착성 퇴적물의 경우에 침강속도는 부유사 농도값이 $0.1 < C < 80$ g/L에서 $0.01 < W_s < 1$ mm/sec의 침강속도 값을 갖는 것으로 확인되었다.

5. 침강특성의 지역적 변화

금강 하구역 미세-점착성 퇴적물 침강속도의 지역적 변화(local variation)를 분석하기 위해 2001년 추계시 금강 하구역 내 4개 지점(1F, 2F, 3F, 4F)에서 채취된 퇴적물 시료의 침강속도곡선이 Fig. 5에 주어지며 침강속도와 상관관계를 분석하기 위해 실행된 4개 지점 퇴적물 시료의 물리·화학적 특성 실험 결과들 또한 지점별로 Table 5에

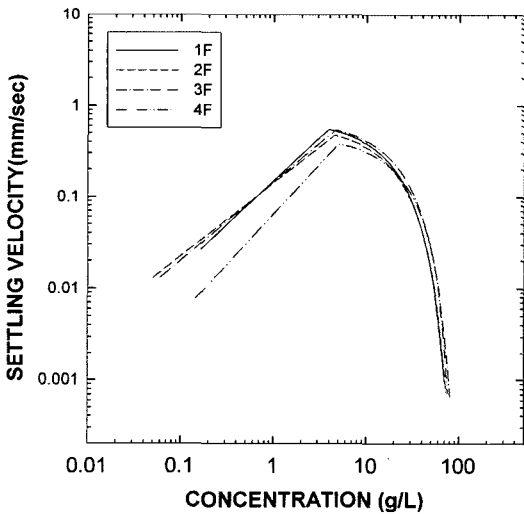


Fig. 5. Change in the settling velocity curve of fine-cohesive sediments in Keum Estuary in the Fall.

Table 5. Physico-chemical property of fine-cohesive sediments in Keum Estuary by each site

특성 항목	1F	2F	3F	4F
평균입경	18 μ m	31 μ m	27 μ m	52 μ m
유기물 함량	2.85%	2.66%	2.24%	1.93%
광물질 구성성분	Quartz, Albite, Illite, Kaolinite, Chlorite			

주어진다. Fig. 5에서 알 수 있듯이, 3개 지점(1F, 2F, 3F) 퇴적물의 침강속도곡선은 전 농도구역에 걸쳐 거의 동일한 값을 가지나 지점 4F 퇴적물의 침강속도는 다른 3개 지점 퇴적물의 침강속도와 상대적으로 상이한 값을 가짐을 알 수 있다. 그러나 4지점 모두의 최대 침강속도 W_{s0} 는 3.90-5.02 g/L의 농도 구역에서 0.38-0.55 mm/s의 값을 가지며 조사구역 내에서 전반적으로 거의 유사한 형태의 침강속도 분포를 가지는 것으로 나타났다.

일반적으로 평균입경이 작을수록, 유기물 함량이 많을수록 점착력이 증가하는 것으로 알려지고 있는데, 이러한 사실을 바탕으로 평균입경이 크고, 유기물함량이 비교적 작은 지점 4F 퇴적물 시료가 다른 3지점에 비해 점착력이 작다고 볼 수 있다. 퇴적물의 광물질 구성성분에 따라서도 점착력이 달라지고 침강속도에 영향을 미칠 수 있으나 이번 실험의 경우 모든 지점의 광물질 구성성분이 거의 동일한 것으로 나타나 지점별 침강속도 변화에 대한 영향분석은 불가능한 것으로 여겨진다.

6. 침강특성의 계절적 변화

금강 하구역 미세-점착성 퇴적물 침강속도의 계절적 변화(seasonal variation)를 분석하기 위해 지점 #2에서 하계, 추계 및 동계시 3회에 걸쳐 퇴적물이 채취되었고, 지점 #1에서 추계 및 동계 2회에 걸쳐 퇴적물이 채취 되었다. 비교/분석을 위한 각 지점별 침강속도곡선이 Fig. 6과 Fig. 7

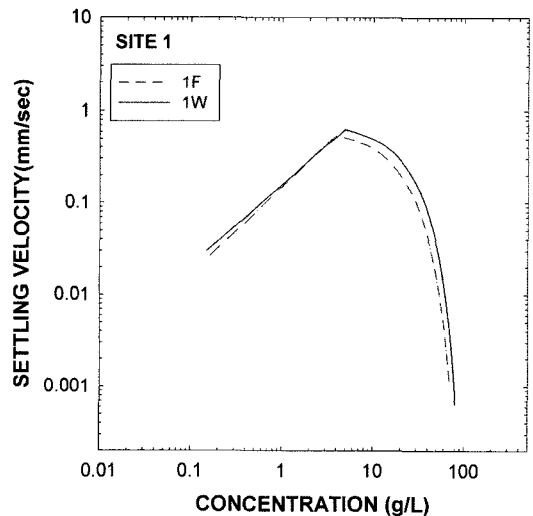


Fig. 6. Seasonal variation in the settling velocity curve of fine-cohesive sediments on SITE 1 in Keum Estuary.

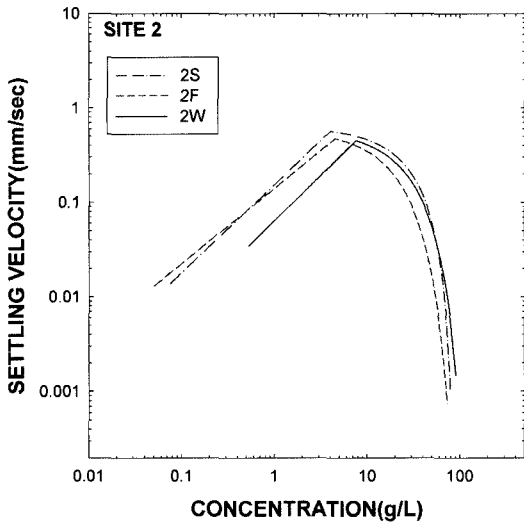


Fig. 7. Seasonal variation in the settling velocity curve of fine-cohesive sediments on SITE 2 in Keum Estuary.

에 주어진다. 또 한 5개 시료에 대한 물리·화학적 특성실험 결과가 Table 6에 주어진다.

먼저 지점 #1의 침강속도분석 결과를 보면 Fig. 6으로부터 추계와 동계시 퇴적물의 침강속도가 전 농도 구역에 걸쳐 거의 유사한 값을 가짐을 알 수 있다. 최대 침강속도는 추계와 동계시에 부유사 농도 3.90 g/L과 4.90 g/L에서 각각 0.55 mm/s와 0.64 mm/s의 값을 가지며 역시 큰 차이가 없다. Fig. 7로부터 지점 #2 퇴적물의 계절별 침강속도 변화를 보면 하계시와 추계시 퇴적물의 경우에는 전 농도 구역에 걸쳐 침강속도분포가 거의 유사한 값을 가지며, 동계시 퇴적물의 경우에는, 앞선 두 계절에 비해 침강속도분포가 응집침강영역에서 차이를 보이고, 최대침강속도를 가지는 부유사 농도 또한 앞선 두 계절에 비해 3 g/L정도로 약간 크다. 하계 및 추계시의 퇴적물과 동계시 퇴적물의 응집영역에서의 침강속도 차이는 평균적으로 0.1 mm/s로 최대 0.2 mm/s를 넘지 않는 것으로 나타났다. 이러한 결과로 미루어 지점 #2에서의 계절별 침강속도 변화 폭 또한 지점 #1과 같이 미소한 것으로 보여진다.

물리·화학적 특성 결과는 지점 #1의 경우 분석된 세 가

지 물리·화학적 특성에 대해 추계 시와 동계시의 퇴적물이 유사한 결과를 나타냈다. 구체적으로 보면 추계 시 퇴적물의 평균 입경과 유기물 함량은 모두 동계 시에 비해 비교적 작게 나타나 침강속도와의 관계 해석에 어려움이 있긴 하나 그 영향력은 미미한 것으로 보인다. 지점 #2의 경우 세 계절의 퇴적물에 대하여 유기물 함량과 광물질 구성성분은 모두 유사하나 평균입경은 하계시의 퇴적물이 다른 두 계절의 퇴적물에 비해 평균 2배 정도 크게 나타났다. 앞에서 거론한 바와 같이 퇴적물의 입자가 굵은 경우 점착력의 감소로 인해 응집침강영역에서 침강속도의 감소를 유발하는데 Fig. 7을 보면 그와는 맞지 않는 결과가 나타났다음을 알 수 있다. 그러나 침강속도의 차이가 미소하므로 물리·화학적 특성과의 연관성에 대한 일반적인 이론에 크게 상반된다고는 볼 수 없다고 여겨진다. 이러한 결과에 대한 정확한 원인은 현재로서는 알 수 없고, 다만 침강속도에 영향을 미치는 인자로서는 본 연구에서 분석된 물리·화학적 특성 뿐 아니라 생물학적 특성을 포함하여 수심 가지에 이르는 것이 사실이고, 이 경우에 그러한 인자들이 영향을 미쳤으리라 여겨진다. 따라서 정확한 분석을 위해서는 이러한 인자들에 대한 연구가 필요하다고 사료된다.

7. 침강특성의 공간적 변화

7.1 금강 하구역 퇴적물과 타 지역 퇴적물과의 침강특성 비교

앞에서 살펴본 바와 같이 금강 하구역 퇴적물의 침강속도 변화는 지역적 및 계절적으로 큰 차이를 보이지 않는 것으로 나타났다. 분석에 이용된 총 7개 퇴적물 시료의 침강속도분포에서 2W와 4F시료의 침강속도곡선이 상대적으로 약간의 예외적인 값을 가졌으나, 나머지 5개 퇴적물 시료의 침강속도곡선은 거의 유사한 값을 가졌다. 따라서 금강 하구역의 총 7개 퇴적물 시료 중 2W와 4F 퇴적물 시료를 제외한 총 5개 퇴적물 시료의 침강속도 분석 결과 자료를 모두 통합하여 도시하였으며, 통합된 침강속도 결과 값들을 이용하여 새로 결정된 침강속도곡선을 Fig. 8에 도시하였다. Fig. 8에 주어진 결과는 지점별 침강속도곡선 결

Table 6. Seasonal physico-cohesive property of fine-cohesive sediments in Keum Estuary

특성 항목	#1		#2		
	1F	1W	2S	2F	2W
평균입경	18 μ m	28 μ m	49 μ m	31 μ m	22 μ m
유기물 함량	2.85%	4.12%	3.77%	2.66%	4.50%
광물질 구성성분	Quartz, Albite, Illite, Kaolinite, Chlorite(극미량으로 2S시료에는 없는 것으로 분석됨)				

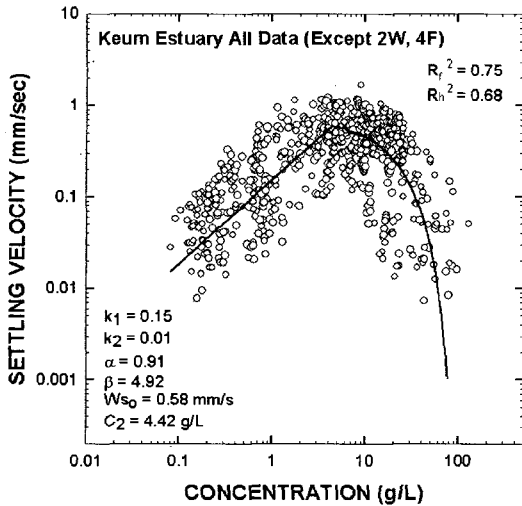


Fig. 8. Settling velocity curve drawn as combining all the results of settling velocity of fine-sediment in Keum Estuary(except of 2W and 4F).

과와 더불어, 퇴적물 이동 예측을 위한 수치모형의 적용시에 사용자의 판단에 따라 편의적으로 사용될 수 있을 것이다. 예측모형 사용자가 금강 하구역의 퇴적물 분포를 세분화하여 퇴적물의 특성에 따른 지역적 변화 및 계절적 변화까지 고려할 경우에는 지점별 침강속도 산정결과를 사용할 수 있으나, 앞선 분석 결과에서와 같이 금강 하구역내에서의 지역적 변화 및 계절적 변화는 그다지 크지 않은 것으로 판단되므로 금강 하구역내의 퇴적물 이동에측 수치모형시에 편의적으로 지역적·계절적 변화를 무시하고 Fig. 8에 주어진 결과를 적용하여도 무방할 것으로 사료된다.

Fig. 8과 같이 도출된 금강 하구역 퇴적물의 침강속도 실험결과와 과거 타 지역 점착성 퇴적물에 대한 실험결과와의 비교·검토를 통하여 갯벌 미세 점착성 퇴적물의 침강특성의 지역적(spatial) 변화에 대한 정성적 분석이 수행되었다. 점착성 퇴적물의 침강특성에 대한 지역적 변화 분석에 대한 연구로서 황규남 등(2002)의 새만금 퇴적물의 침강속도 실험결과와 영국 Severn하구언(Mehta, 1986), 미국 Tampa만(Ross, 1988) 및 미국 Okeechobee호(Hwang, 1989) 점착성 퇴적물들에 대한 침강속도 실험결과를 비교 분석한 바가 있다. 황규남 등(2002)의 분석결과를 바탕으로 본 연구에서는 앞서 도출된 금강 하구역 침강속도 실험결과를 추가하여 점착성 퇴적물 침강특성의 지역적 변화를 분석하였으며 금강 하구역 침강속도 실험결과를 포함한 각 지역의 침강속도 실험결과가 Fig. 9에 주어진다.

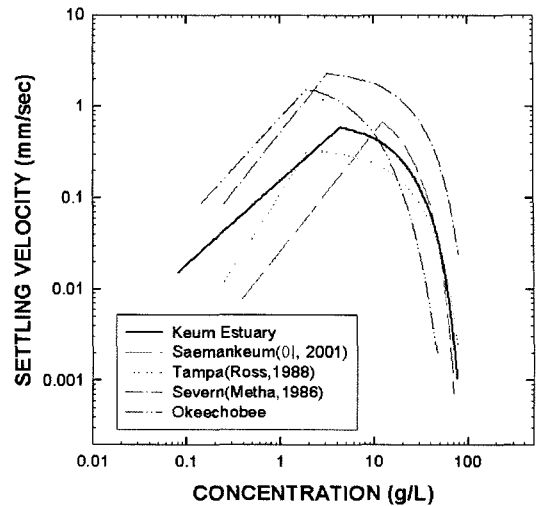


Fig. 9. Comparison of settling velocity for fine-cohesive sediments.

Fig. 9에서 알 수 있듯이, 각 침강속도 곡선은 주어진 부유사 농도 값에 대해 정량적으로 상당히 다른 침강속도 값을 갖는다. 농도의 증가와 함께 침강속도가 증가하는 응집 침강 영역(혹은 저농도 구간 : $C < 3$ g/L)에서 금강 하구역 퇴적물의 침강속도는 평균적으로 새만금 퇴적물의 침강속도보다 10배 정도 크고, Okeechobee호와 Severn하구언 퇴적물보다는 약 10배 정도 작다. 한편, 중농도 구간($9 < C < 40$ g/L)에서는 금강 하구역 퇴적물의 침강속도가 새만금 퇴적물의 침강속도보다는 작아지고, Okeechobee호의 퇴적물보다는 오히려 커지며, Severn하구언보다는 계속해서 작은 값을 가진다. 고농도 구간($C > 40$ g/L)의 경우에는 Okeechobee호 퇴적물이 가장 작은 침강속도 값을, 그리고 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 최대침강속도는 부유사 농도 값이 약 1~2 g/L일 때 발생하고, 금강 하구역 및 Severn하구언의 퇴적물은 3~5 g/L인 부유사 농도에서 최대 침강속도를 가지며, 새만금 퇴적물의 경우에는 비교적 그 차이가 큰 약 16 g/L의 부유사 농도 값에서 최대침강속도를 가진다.

황(2000), 이(2001)등에 의해 분석된 바와 같이 정량적인 측면에서의 침강속도 크기의 이러한 현저한 차이가 의미하는 바는 점착성 퇴적물의 경우에 그 침강특성은 퇴적물 자체의 물리·화학적 기본특성에 따라 지역적으로 크게 변화할 수 있다는 것이다. 이러한 사실은 타 지역 퇴적물

의 침강속도 자료는 특정 지역에서의 점착성 퇴적물의 이동예측을 위한 수치모형실험을 위해 사용될 수 없다는 것을 나타내며, 침강속도 산출을 위한 현장관측이나 실내실험이 각 조사대상 지역에서 반복적으로 수행되어야 한다는 것을 의미한다.

7.2 물리·화학적 특성이 퇴적물의 침강특성에 미치는 영향

본 연구에서는 침강속도 특성의 지역적 변화 및 계절적 변화 분석에서의 마찬가지로 지역적 변화 원인에 대해서도 퇴적물 자체의 물리·화학적 특성과 연계하여 정성적으로 분석하였다. 앞서와 같이 황규남 등(2002)이 연구한 바 있는 새만금과 Okeechobee호 퇴적물간의 침강특성의 정량적 차이에 대한 각각의 퇴적물의 물리·화학적 특성과 연계한 정성적 분석을 바탕으로 금강 하구역 퇴적물을 포함하여 분석하였다. 금강 하구역과 새만금 및 Okeechobee호 퇴적물의 물리·화학적 특성은 Table 7에서 비교되며, 세 지역의 퇴적물에 대한 침강속도 곡선은 Fig. 10에 주어진다.

Table 7에서 보여지듯이 새만금 퇴적물의 평균입경은 Okeechobee호 퇴적물보다 평균입경에서 약 4배 정도가 크며, 금강 하구역의 평균입경은 그 중간정도의 크기이다. 반면에 유기물 함량에서는 새만금 퇴적물이 Okeechobee호 퇴적물보다 20배 정도가 작으며, 금강 하구역 퇴적물은 새만금보다 약간 크긴 하나 거의 같다. 한편, 광물질 구성성분에서는 금강 하구역과 새만금 퇴적물은 석영이 주된 광물질로 구성되어 있으며, Okeechobee호 퇴적물은 고령토가 주된 광물질 성분이다. 앞서 설명한 바와 같이 일반적으로 점착성 퇴적물은 평균입경이 작을수록, 그리고 유기물 함량이 클수록 점착력이 증가하는 경향이 있으며, 또한 광물학적 측면에서 보면, 보편적으로 점착성 퇴적물에 많이 함유되어 있는 고령토, 일라이트, 녹니석 등의 광물성 점토보다 석영은 훨씬 작은 점착력을 갖는다. 따라서, Okeechobee호 퇴적물보다 상대적으로 평균입경이 크고 유기물함량이 작으며, 점착력이 비교적 작은 석영을 주성분으로 하는 새만금 퇴적물은 점착력에 의한 침강효과보다는 중력에 의한 침강효과가 Okeechobee호 퇴적물의 경우보다 상대적으로 더 클 것

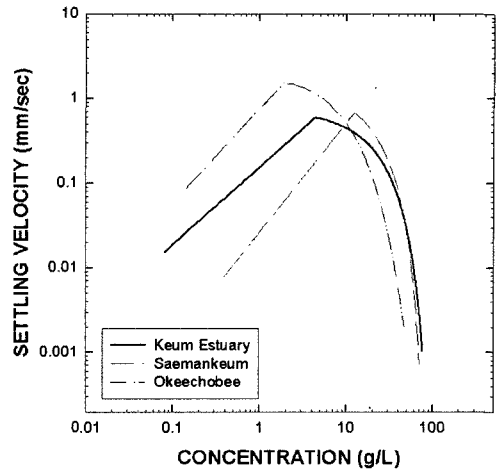


Fig. 10. Comparative curve of the assessed results of settling velocity in Keum Estuary, Saemankeum and Lake Okeechobee.

으로 판단된다.

이러한 해석은 응집침강 영역과 간섭침강 영역에서의 두 퇴적물의 침강속도 크기를 정량적으로 비교할 때에 그 타당성을 갖는다. 퇴적물의 점착력이 크다는 것은 부유토사 입자간의 응집력이 크다는 것을 의미하므로, 응집 효과에 의한 침강속도의 증가가 지배적인 응집침강 영역에서 상대적으로 점착력이 작고 중력의 효과가 큰 새만금 퇴적물은 Okeechobee호 퇴적물의 침강속도보다 작은 침강속도를 갖게 되었다고 해석할 수 있다(Fig. 10참조). 반면에 고농도 시에 토사 입자간의 응집효과가 침강속도를 감소시키는 간섭침강 영역에서는 점착력이 더 큰 Okeechobee호 퇴적물이 새만금 퇴적물보다 작은 침강속도를 갖는 결과가 초래되었다고 설명될 수 있다.

Fig. 10을 보면 금강 하구역 퇴적물의 침강속도는 응집 침강 영역에서는 새만금과 Okeechobee호 퇴적물의 침강속도 결과의 중간 정도의 크기를 가지며, 간섭침강영역의 초기부분에서는 역시 두 결과의 중간 크기를 가지다가 부유사 농도가 40 g/L이상인 고농도영역에서는 새만금보다 근소한 차이로 더 크게 나타났다. 이러한 결과는 물리·화학적 특성 중 평균입경면에서 금강 하구역 퇴적물의 평균입

Table 7. Comparison to the physico-chemical property in Keum Estuary, Saemankeum, and Lake Okeechobee

특성 항목	금강 하구역	새만금	Okeechobee호
평균입경	32 μm	52 μm	15 μm
광물질 주성분	석영(Quartz)	석영(Quartz)	고령토(Kaolinite)
유기물 함량	3.15%	2%	40%

경이 새만금과 Okeechobee호 퇴적물의 중간값을 가지므로 이론적으로 타당한 결과이며, 유기물 함량 및 광물질 구성 성분면에서는 새만금과 금강 하구역 퇴적물의 유기물 함량과 광물질 주요 구성 성분이 유사한 것으로 볼 때 물리·화학적 특성 중 입경분포가 침강속도에 미치는 영향이 유기물 함량과 광물질 구성성분보다는 더 큰 것으로 보여진다.

8. 결 론

점착성 퇴적물의 침강특성은 입자간의 응집과 밀접한 관계가 있고, 응집강도는 입경분포, 광물질구성, 유기물함량 등으로 묘사되는 퇴적물의 물리·화학적 기본특성에 따라 크게 좌우되므로, 본 연구에서는 금강 하구역 미세·점착성 퇴적물의 물리·화학적 특성과 침강속도를 실내 실험을 통하여 정성적 및 정량적으로 산정하였고, 산정된 침강속도의 지엽적·계절적 변화 및 공간적 변화를 퇴적물의 물리·화학적 특성과 연계하여 분석하였다.

금강 하구역 퇴적물의 물리·화학적 특성에 대한 실험분석 결과에 따르면, 평균입경은 18 μm ~52 μm 의 범위를 가지며 총 7개 시료 중 2S와 4F 시료의 평균입경이 다른 시료에 비해 비교적 크게 나타났다. 유기물 함량은 전체적으로 큰 차이를 보이지 않았으며 평균적으로 3.15%의 값을 가졌다. 광물질 구성성분 역시 모든 지점에서 거의 동일하며, 구성성분으로는 석영(Quartz), 미사장석(Albite), 일라이트(Illite), 고령토(Kaolinite), 녹니석(Chlorite)등으로 나타났다. 침강속도 산정결과는 전형적인 점착성 퇴적물의 침강특성인 침강속도가 증가하는 영역과 감소하는 영역, 즉 응집침강영역과 간섭침강영역을 명확히 보여주었다. 침강속도는 모든 퇴적물 시료에 대해 부유사 농도값이 $0.1 < C < 80 \text{ g/L}$ 인 구간에서 $0.01 < W_s < 1 \text{ mm/sec}$ 사이의 침강속도 값을 갖는 것으로 나타났다. 지엽적 변화 분석에서는 총 4개 지점의 퇴적물 시료 중 4F 퇴적물 시료가 다른 세 지점에 비해 침강속도가 응집침강영역에서 비교적 작은 값을 가지는 것으로 나타났으나 전반적으로 큰 변화는 없는 것으로 나타났다. 계절적 변화 분석은 #1과 #2, 두 개 지점의 퇴적물 시료에 대해 이루어졌으며, 지점 #1에서는 계절별로 거의 동일한 침강속도를 가졌으며 지점 #2의 경우 세 계절의 퇴적물 시료 중 동계시의 퇴적물 시료(2W)가 응집침강 영역에서 미소하긴 하나 다른 두 계절에 비해 작은 값을 가지는 것으로 나타났으나 지엽적 변화와 마찬가지로 전반적으로 큰 변화는 없는 것으로 나타났다. 금강 하구역 미세·점착성 퇴적물 침강속도의 지엽적 및 계절적 변화 분

석을 통해서 전체적으로 큰 차이가 없는 것으로 나타났으므로 침강실험으로부터 산정된 모든 침강속도 결과를 통합하여 금강 하구역내 점착성 퇴적물의 침강속도가 산정되었다. 이렇게 산정된 침강속도는 과거 타 지역 점착성 퇴적물 침강속도와 비교되었으며, 그 결과, 금강 하구역의 침강속도는 새만금을 비롯한 여러 지역들과도 상당히 큰 차이를 보이는 것으로 나타났다. 한편, 물리·화학적 특성과 연계한 금강 하구역과 새만금 및 Okeechobee호 퇴적물의 침강속도 비교, 분석에서는 퇴적물의 물리·화학적 특성 중 입경분포특성이 유기물 함량과 광물질 구성성분보다는 침강특성에 미치는 영향이 더 큰 것으로 나타났다.

본 연구에서 도출된 금강 하구역 미세·점착성 퇴적물 침강속도의 정량적 결과는 향후에 금강 하구역에서의 해저지형변화 해석을 위한 수치모형 프로그램 사용시 요구되는 점착성 퇴적물의 침강특성 입력 자료로 사용될 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. 점착성 퇴적물의 침강·침식특성 현장특성(site-specific)에 현저하게 의존하는 특성을 가지므로, 황규남(2000), 이재연(2001) 등에 의해 강조된 바와 같이 침강속도 산출을 위한 현장관측이나 실내 실험이 각 조사대상 지역에서 반복적으로 수행되어야 한다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(과제번호 R05-2001-000-01343-0)지원으로 수행되었음.

참고문헌

- 군산항건설사무소, (1989). 금강하구 수리현장조사 보고서, 1. 현지자료조사. (주)한국해양과학기술
- 박용철 (1997). 해양환경공정시험방법. 한국해양학회, 국립수산진흥원.
- 이재연 (2001). 새만금 해역 갯벌 퇴적물의 침강 특성에 관한 연구. 석사학위논문, 전북대학교.
- 황규남 (2000). 새만금 갯벌퇴적물의 침강속도 산정을 위한 실험적 연구. 대한토목학회논문집, 20(2-B), 277-286.
- 황규남, 조용식, 이태환 (2002). 새만금 미세점착성 퇴적물의 침강특성: 퇴적물의 물리·화학적 특성의 영향. 한국수자원학회논문집, 35(5), 475-484.
- American Society for Testing and Materials (1987). Annual Book of A.S.T.M. Standards. Vol. 04.08, American Society

- for Testing and Materials, Philadelphia, U.S.A.
- Choi, J.H. (1981). Recent clay minerals in the Kunsan estuary and the adjacent continental shelf. M. Sc. Thesis, Dept. of Oceanography, S.N.U.
- Hwang, K.-N. (1989). Erodibility of fine sediment in wave-dominant environments. Master's Thesis, University of Florida.
- 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.
- 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, 48, 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, 290-325.
- Ross, M.A. (1988). Cohesive sediments in estuarine environment. Ph.D. Dissertation, Univ. of Florida, Gainesville, FL.
-
- Received May 11, 2006
Accepted September 19, 2006