

서해안 갯벌 점착성 퇴적물 침강속도 곡선식의 재검토

황규남⁽¹⁾

Re-estimation of Settling Velocity Profile Equations for Muddy Cohesive Sediments in West Coasts

by

K.-N. Hwang⁽¹⁾

요 약

미세점착성 퇴적물 침강속도의 정량적 산정은 퇴적학적 측면에서뿐만 아니라 환경공학적 측면에서도 매우 중요한 과제이다. 미세점착성 퇴적물의 침강특성은 입자간의 충돌과 입자간의 점착으로 인하여 발생하는 응집에 의해 크게 영향을 받는다. 한편, 미세점착성 퇴적물의 응집강도는 광물질 구성, 입경분포, 유기물 함량 등으로 묘사되는 퇴적물의 물리·화학적 기본 특성에 따라 크게 변화하고, 이러한 물리·화학적 기본특성은 또한 지역적으로 변화하므로, 한 특정지역에서의 점착성 퇴적물의 침강특성은 현장관측이나 실내실험을 통하여 관측되어야만 한다. 본 연구에서는 최근 수행된 새만금 및 군산해역 점착성 퇴적물의 침강속도 관측 결과를 이용하여, 기존의 침강속도 경험식을 검토하고, 새로운 침강속도 곡선식이 개발된다. 새로 개발된 침강속도 곡선식은 기존의 복잡한 곡선식에 비해 단순하며, 측정치로부터의 계수산정이 편리하고, 또한 측정치의 변화 경향을 더욱 잘 나타낸다.

Abstract

Quantifying the settling velocities of fine-cohesive sediments is very essential in the study of ocean pollutions as well as sedimentations. Settling properties of fine-cohesive sediments are influenced largely by aggregation which occurs as a consequence of interparticle collision and cohesion of particles. Since the degree of cohesion of fine-cohesive sediments depends on physico-chemical properties such as grain size distribution, percentage of organic materials, and mineralogical compositions, and these physico-chemical properties varies regionally, the settling velocities of fine-cohesive sediments for a specific site should be determined through field or laboratory experiment. Recently, settling velocities of fine-cohesive sediments in Saemankeum coasts and Kunsan Estuary have been measured through laboratory experiments. Using these data, the previously proposed well-known settling velocity equations for fine-cohesive sediments are examined and a new equation is developed for better representation of the measured data in this study. The newly developed settling velocity equation is simpler in the form and easier in determining the related coefficients than the previous well-known equations.

(1) 정회원, 전북대학교 토목환경공학부, 공학연구원 공업기술연구센터, khwang@moak.chonbuk.ac.kr

Keywords: Settling Velocity, Cohesive Sediment, Flocculated Settling, Hindered Settling, Free Settling, Settling Flux

1. 서 론

우리가 흔히 갯벌이라 칭하는 미세점착성 퇴적물의 이동예측을 위한 연구는 퇴적학적 측면에서뿐만 아니라 환경공학적인 측면에서도 매우 중요한 과제이다. 퇴적학적 측면에서의 대표적인 예는 하구(estuary)나 만(bay)에서의 급격한 퇴적물의 증가로 인한 항로매몰 현상이라 할 수 있으며, 환경공학적인 측면에서는 미세토사 입자가 갖는 점착성으로 인하여 PCB(polychlorinated biphenyls) 등과 같은 독성 물질들과 쉽게 결합·퇴적되어 발생하는 수층 및 저층 퇴적물의 오염 및 준설을 통한 환경정화 사업시 재부유되고 이동되어 야기되는 인근해역으로의 오염의 확산(이[1999]) 등이라 할 수 있다.

대부분의 경우에 하구의 미세점착성 퇴적물은 보통 무기성 광물(inorganic mineral), 유기물(organic material) 및 생화학물질(biochemicals)의 혼합체이며, 광물 입자들은 주로 점토와 실트로 구성되어 있다. 이러한 혼합체의 침강 혹은 퇴적 특성은 사질성 퇴적물(모래질)과는 달리 입자간의 응집 현상에 의해 크게 영향을 받는다. 또한 점착성 퇴적물의 응집강도는 광물질 구성, 양이온 전도율, 입경분포, 유기물 함량 등으로 묘사되는 물리·화학적 기본특성에 따라 크게 변화하고(Mehta[1986]), 이러한 기본특성은 "site-specific"한 성격을 갖는다. 따라서 점착성을 갖는 퇴적물의 침강속도는 입경의 함수로 표현되는 Stokes식으로 산정될 수 없으며, 부유사 농도의 함수로 표현하는 것이 일반적이다(Krone[1962]; Mehta, [1988]; Burt[1986]; van Leussen[1988]).

현재 미세점착성 퇴적물의 침강속도에 대한 이론적 해는 없으며, 현장이나 실험실 실험을 통하여 측정하는 것이 최선이다. 일반적으로 침강속도 영역은 부유사 농도 크기에 따라 자유침강(free settling), 응집침강(flocculation settling) 및 간섭침강(hindered settling)의 3개 영역으로 분류되며(Hwang and Mehta[1989]), 자유침강 영역에서는 Stokes 이론, 응집침강 영역에서는 Krone식[1962], 간섭침강 영역에서는 Kynch식[1952]이 널

리 적용되어 왔다. 그러나 Krone 및 Kynch식은 미지의 계수들을 포함하고 있어, 이러한 계수들은 침강속도 측정치에 최소사승접합법으로 각 식들을 적용하여 산정하여야 한다.

최근 황 등[2000, 2001]은 새만금 해역 및 군산 해역 미세점착성 갯벌 퇴적물에 대한 침강속도 측정을 수행하고, 응집침강 영역과 간섭침강 영역에 각각 Krone 및 Kynch식을 적용하여 각 계수들을 결정하였다. 그러나 이 결과에 따르면, 침강속도 측정치는 일부 구간에서 기존의 침강속도 곡선식과는 다소 다른 결과를 보이는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서는 이러한 관측결과에 근거하여 새로운 침강속도 경험식을 개발하고자 한다. 새로운 침강속도 곡선식의 개발은 우선적으로 측정치의 변화 경향을 잘 나타낼 수 있도록 하는데 초점을 두었으며, 이와 더불어 관련계수의 산정시에 복잡성을 해소하는데 중점을 두었다.

2. 기존 침강속도 식의 검토

점착성 퇴적물의 침강속도는 부유사 농도와 가장 관련이 깊다. 더욱이, 점착성 퇴적물의 침강속도는 단지 퇴적물 토사(sediments)만의 함수가 아니라 부유체(suspension)의 함수이다.

사질성 퇴적물과는 달리 점착성 퇴적물의 경우에, 부유 혹은 침강 중의 토사입자들은 입자간의 충돌과 입자들이 지닌 점착성으로 인하여 입자간의 응집(aggregation)이 발생한다. 토사입자들이 갖는 점착성은 주로 퇴적물의 광물질 구성성분(mineralogical composition)과 양이온 전도율(cation exchange rate)에 따라 그 크기가 크게 변화한다(van Olphen[1963]). 한편, 입자간의 충돌빈도는 Brown 운동, fluid shearing(즉, 난류강도), 차등침강(differential settling)에 따라 변화하며, 이 중에 난류의 강도가 가장 중요한 인자로 여겨지고 있다. 그러나 하구에서의 개조(slack water)시와 같이 정지흐름(quiescent flow) 조건에서는 차등침강이 가장 중요한 인자가 되며(Mehta[1998]), 실제 현장과 같은 자연조건하에서

는 Brown 운동이 이들 3가지 입자 중에 차지하는 비중이 가장 작다(Krone[1962]).

응집된 토사입자 덩어리는 flocc(또는 aggregate)이라 불리며 이 flocc들은 각 개개의 입자가 본래 갖는 물리적 특성과는 다른 특성을 갖게 된다. 이들 입자들의 상대밀도는 입자사이의 공극수(interstitial water)로 인하여 축소되므로, 결과적으로 침강속도를 감소시키는 효과를 갖는다. 그러나 그 모양은 점점 더 원형을 띠게 되며 크기는 더욱 커져 침강시의 작용 항력(drag)은 축소되므로, 이는 침강속도를 증가시키는 효과를 갖는다. 항력의 축소와 입자 크기의 증가로 인한 침강속도의 증진 효과는 밀도의 축소로 인한 침강속도의 감소 효과 보다 더 크게 나타나므로, flocc의 침강속도는 개개 입자들의 침강속도 보다 더 큰 값을 갖는 것이 일반적이다.

침강속도(W_s)와 부유사 농도(C) 간의 전형적인 관계는 Fig. 1에 주어지며, 이에 대응하는 침강플럭스($F_s = W_s C$)의 변화 또한 그림에 함께 주어진다. 그림에 도식된 바와 같이 침강속도는 부유사 농도에 따라 보통 3개 영역인 자유침강(free settling) 영역, 응집침강(flocculated

settling) 영역, 및 간섭침강(hindered settling) 영역으로 분류된다. 각 영역에서의 침강특성은 아래와 같다.

2.1 자유침강

자유침강은 Fig. 1에 도식된 바와 같이 부유사 농도 C 가 C_1 보다 작은 영역에서 발생한다. 이 영역에서 개개의 토사입자 혹은 토사입자들의 덩어리 상태인 flocc들은 입자들간의 상호 충돌 등에 의한 간섭과 방해 없이 독립적으로 침강하며, 침강속도는 부유사 농도와 무관하게 되고 사질성(비점착성) 퇴적물의 경우와 같이 입자의 입경, 형상 등에 의해 크게 좌우된다. 점착성 퇴적물의 경우에, C_1 은 보통 0.1~0.3 g/L 사이의 값을 갖는다(Mehta[1988]).

자유침강 영역에서 개개 토사입자들의 침강속도는 항력과 부력 사이의 균형에 의해 결정된다. 모든 레이놀즈수에 대해 직경 d 인 구형 입자의 침강속도는 다음과 같이 주어진다.

$$W_s^2 = \frac{4}{3} \frac{gd}{C_D} \frac{(\rho_s - \rho_w)}{\rho_w} \quad (1)$$

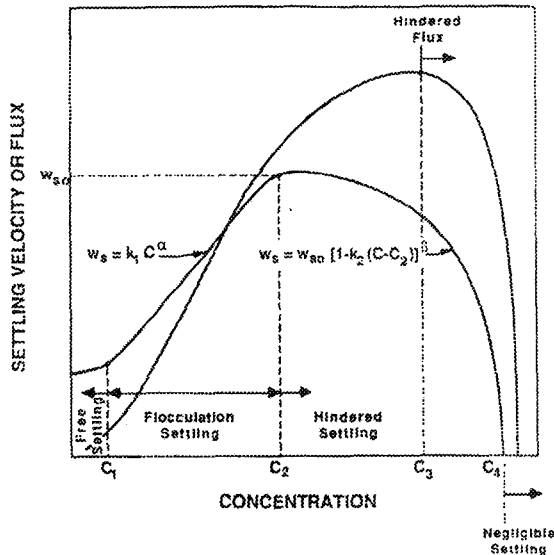


Fig. 1 A Schematic Description of Settling Velocity Variation with Suspension Concentration of Fine-Cohesive Sediment

여기서 C_D 는 항력계수이고, ρ_s 와 ρ_w 는 각각 토사입자의 밀도 및 유체의 밀도를 나타낸다.

Stokes 구간(즉, $Re < 0.1$)에서 항력계수는 $C_D = 24/Re$ 로 주어지며, 이로부터 침강속도는 Stokes 법칙에 따라 다음과 같이 된다.

$$W_s = \frac{gd^2}{18\nu} \frac{(\rho_s - \rho_w)}{\rho_w} \quad (2)$$

여기서 ν 는 유체의 동점성계수이며, 레이놀즈수가 큰 경우에 C_D 는 앞서와 같이 레이놀즈수의 함수가 되며 해석적인 표현은 불가능하다.

입자의 형상이 침강속도에 미치는 영향은 일반적으로 형상계수를 사용하여 표현된다. 형상계수가 고려된 입경을 사용한다면, (2)식은 점착성 퇴적물의 자유침강 영역에서의 침강속도 산정을 위해 유효한 것으로 여겨진다(Ross[1988]).

2.2 응집침강

응집침강 영역으로 분류되는 부유사 농도 C_1 과 C_2 사이에서는 부유사 농도의 증가와 더불어 입자 상호간의 충돌율이 증가하게 되어, 결과적으로 입자간의 응집율이 향상된다. 따라서, 이 영역에서는 농도가 증가함에 따라 저농도시의 flocc들보다 결속력이 더 강하고, 밀도가 더 크며, 크기가 더 커진 flocc들이 형성되어, 농도의 증가와 함께 침강속도는 증가하게 된다.

이 영역에서의 침강속도에 대한 전형적인 표현식은 부유사 농도의 함수로서 power law의 형태로 다음 (3)식과 같이 주어진다.

$$W_s = k_1 C^\alpha \quad (3)$$

여기서 α 는 Fig. 1에서 log-scale로 주어진 침강속도 곡선의 기울기를 나타내며, 이론적으로 4/3이나, 실제 값은 일반적으로 0.8과 2 사이의 값을 갖는다(Krone[1962]; Mehta[1988]). 부유사 농도 C 가 1 g/L일 때의 침강속도를 나타내는 비례상수 k_1 은 퇴적물의 구성성분과 흐름조건에 따라 크게 변화할 수 있다.

2.3 간섭침강

부유사 농도 C 가 C_2 보다 큰 경우에는 고농도의

상태로, 토사 입자들의 덩어리인 flocc들이 격자망(network)을 형성하여 공극수(interstitial water)의 상승이동을 방해하게 된다. 결과적으로 이 영역에서는 Fig. 1에 도식된 것처럼 부유사 농도 C 가 증가할수록 침강속도 W_s 는 감소하며(Kynch[1952]), 이러한 침강을 일반적으로 간섭침강이라 한다.

간섭침강 영역에서의 침강속도는 일반적으로 다음 (4)식과 같이 주어진다.

$$W_s = W_{s0} [1 - k_2(C - C_2)]^\beta \quad (4)$$

여기서 W_{s0} 는 최대침강속도이며, C_2 는 침강속도가 최대일 때의 부유사 농도를 나타낸다. 또한 비례상수 k_2 는 $W_s = 0$ 일 경우에 C_2 에 대한 상대 부유사 농도의 역수를 의미하며, β 는 이론적으로 5의 값을 갖는다(Hwang and Mehta[1989]).

2.4 침강플럭스 (Settling Flux)

부유사 농도의 변화에 따른 침강플럭스의 변화 또한 Fig. 1에 주어진다. 부유사 농도 변화에 따른 침강플럭스 변화의 가장 중요한 특징은 부유사 농도 C 가 C_2 보다 큰 경우에 비록 침강속도는 감소하나, 침강플럭스 F_s 는 최대 침강플럭스가 발생하는 C_3 지점까지 농도의 증가와 함께 계속적으로 증가한다는 것이다. 이러한 현상은 C_2 와 C_3 사이에서 부유사 농도의 증가율에 비해 침강속도의 감소율이 비교적 작기 때문에 발생한다. 부유사 농도가 C_3 보다 더 큰 경우에는 침강플럭스 또한 비교적 빠르게 감소한다.

3. 기존 침강속도 관측자료의 분석

과거 황 등[2000]은 새만금해역 6개 지점에서 표본 채취한 갯벌 점착성 퇴적물에 대하여 침강실험을 수행하고 각 부유사 농도에서의 침강속도를 측정하였다. 침강실험은 특수 제작된 높이 1.8m의 침강수주를 이용하여 multi-depth 부유사 농도 채취방법으로 수행되었으며, 각 부유사 농도에서의 침강속도는 침강수주에서의 시간에 따른 농도변화 측정값들에 Ross[1988]가 개발한 침강속도 산정 수치프로그램을 적용하여 결정되었다.

침강실험 과정 및 Ross[1988]의 수치모형을 이용한 침강속도 산정 방법 등에 대한 자세한 사항은 황[2000]에 주어진다.

황 등[2000]의 침강속도 측정결과에 침강속도 산정식인 (3)식과 (4)식을 적용한 결과는 Fig. 2에 주어진다. 그림에서 알 수 있듯이, 침강속도 측정결과는 침강속도가 증가하는 응집침강 영역과 감소하는 간섭침강 영역을 명확히 보여주고 있다. 측정치를 (3)식과 (4)식으로부터 구한 점합곡선과 관련하여 좀 더 자세히 살펴보면, 우선 간섭침강 영역에서 (4)식의 점합곡선은 지수함수적으로 침강속도의 감소를 보이는 측정치와 잘 일치한다고 할 수 있다. 그러나 응집침강 영역에서의 침강속도 측정치는 (3)식의 점합곡선과는 다소 일치하지 않는 것으로 보인다. 특히, 부유사 농도 1~3 g/L 구간에서의 침강속도 측정치를 고려할 때 응집침강 영역에서의 침강속도 변화는 (3)식과 같이 power law를 따라 선형적 형태라고 하기는 어려우며, 반면에 간섭침강 영역과 응집침강 영역 전체에 걸쳐 비교적 포물선적인 형태를 갖는다고 할 수 있다. 이러한 경향은 이미 과거에 Wolanski et al.[1989]에 의해 관측된 바 있으며, 최근 군산해역 1개 지점의 갯벌 퇴적물에 대해 수행된 황 등[2001]의 침강속도 측정결과 또한 동일한 경향을 보여주고 있다(Fig. 3 참조).

4. 새로운 침강속도 식의 산정

앞서의 새만금해역 및 군산해역 갯벌 점착성 퇴적물의 침강속도 측정결과 분석에 비추어 침강속도는 응집침강 영역과 간섭침강 영역 전체에 걸쳐 하나의 포물선 형태로 변화하는 것으로 판단되므로 본 연구에서는 포물선형을 갖는 새로운 침강속도 곡선식을 도출하고자 하였다. 또한 기존의 침강속도 경험식은 응집침강 영역과 간섭침강 영역에서 각기 서로 다른 2개의 경험식으로 되어 있어 측정자료로부터 점합곡선을 도출하는 과정이 비교적 복잡하고 어려우므로, 새로이 도출되는 경험식은 응집침강 영역과 간섭침강 영역 모두에서 적용할 수 있으며, 가능하면 점합곡선을 쉽게 산정할 수 있도록 하였다.

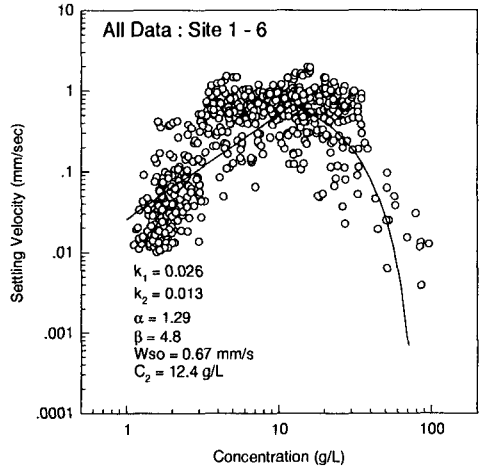


Fig. 2 Settling velocity variation with concentration for Saemankeum cohesive sediments (Hwang et al.,[2000])

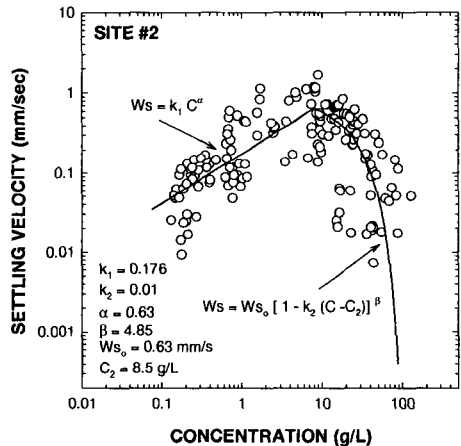


Fig. 3 Settling velocity variation with concentration for Kunsan cohesive sediments (Hwang et al.,[2001])

본 연구에서는 포물선형이라는데 착안하여 Wolanski et al.[1989]의 제안식을 수정하여 응집 침강 영역과 간섭침강 영역 모두에 적용할 수 있는 다음과 같은 침강속도 경험식을 개발하였다.

$$W_s = \frac{aC^n}{(C^2 + b^2)^m} \quad (5)$$

여기서 a, b, n, m은 포물선형의 일반 형태를 나타내기 위한 계수이며, 침강속도 측정치에 최소자승접합법을 적용하여 구하여야 할 미지수이다. 한편, (5)식은 부유사 농도의 크기에 따라 다음과 같이 간략화 되는 특징을 갖는다.

$$W_s = ab^{-2m}C^n \quad \text{if } C^2 \ll b^2 \quad (6)$$

$$W_s = aC^{n-2m} \quad \text{if } C^2 \gg b^2 \quad (7)$$

따라서, 침강속도 측정치로부터 접합곡선을 구하고자 할 경우에 4개의 미지수 a, b, n 및 m은 이 두 식들로부터 쉽게 결정될 수 있다. 새만금해역 및 군산해역 퇴적물의 침강속도 측정치에 이 식들을 적용하여 구한 포물선형 침강속도 접합곡선은 Fig. 4와 5에 각각 주어진다. Fig. 4와 관련하여 (6)식은 응집침강 영역에서의 접합곡선의 직선 구간을 나타내며, (7)식은 간섭침강 영역에서의 접합곡선의 직선 구간을 나타낸다. (6)식에서 n은 응집침강 영역에서 직선 구간의 경사를 나타내며, (7)식의 a는 응집침강 영역에서의 직선 구간을 연장시켰을 때 $C = 1\text{g/L}$ 에서의 침강속도 W_s 의 값을 나타낸다. Fig. 4에서 이러한 방법으로 구한 a, b, n, m의 값은 각각 4354, 7.73, 3.86, 3.47이다.

한편, (5)식을 C로 미분하면 최대침강속도 W_{so} 가 얻어진다. 따라서 최대침강속도 W_{so} 와 이 때의 부유사 농도 C_2 는 다음과 같이 주어진다.

$$W_{so} = \frac{a}{b^{2m-n}} \frac{\left(\frac{2m-1}{n}\right)^{m-n/2}}{\left(\frac{2m}{n}\right)^m} \quad (8)$$

$$C_2 = \frac{b}{\sqrt{2m/n-1}} \quad (9)$$

또한, 침강속도와 부유사 농도 C의 곱으로 정의되는 침강플럭스 F_s 는 다음과 같이 주어진다.

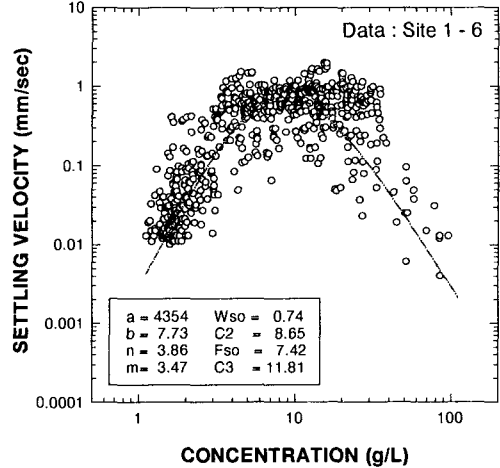


Fig. 4 Application of Eq. (5) to measured settling velocity data for Saemankeum cohesive sediments

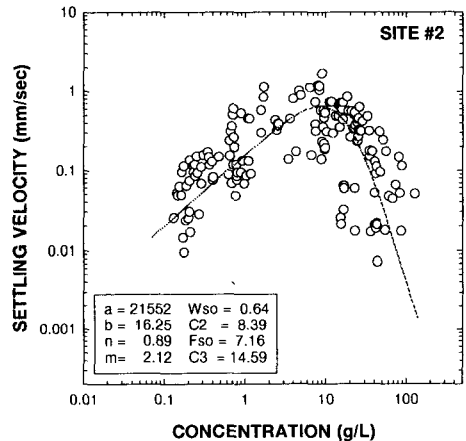


Fig. 5 Application of Eq. (5) to measured settling velocity data for Kunsan cohesive sediments

$$F_s = W_s C = \frac{aC^{n+1}}{(C^2 + b^2)^m} \quad (10)$$

앞서의 침강속도의 경우와 동일하게 미분을 적용하면, 최대침강플럭스 F_{so} 와 그 때의 부유사 농도 C_3 는 다음과 같이 주어진다.

$$F_{so} = \frac{a}{b^{2m-(n+1)}} \frac{\left(\frac{2m}{n+1} - 1\right)^{m-(n+1)/2}}{\left(\frac{2m}{n+1}\right)^m} \quad (11)$$

$$C_3 = \frac{b}{\sqrt{2m/(n+1) - 1}} \quad (12)$$

(8), (9), (10) 및 (11)식으로부터 구한 새만금 및 군산해역 갯벌 퇴적물의 침강속도 특성인자들 (W_{so} , C_2 , F_{so} 및 C_3)의 값들은 각각 Fig. 4와 5에 주어진다.

5. 요약 및 결론

본 연구에서는 최근 수행된 황 등[2000, 2001]의 새만금해역 및 군산해역 점착성 퇴적물의 침강속도 관측결과를 이용하여, 기존의 침강속도 곡선식의 타당성을 검토하였다. 간섭침강 영역에서의 침강속도 측정 결과는 농도가 증가할 때 포물선 형태로 급격한 감소를 하는 Kynch식과 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다. 그러나, 응집침강 영역에서의 침강속도 측정 결과는 농도가 증가할 때 선형적 증가를 나타내는 Krone식과는 다소 다르게 포물선 형태로 증가함을 보여주었다. 따라서 본 연구에서는 이러한 관측결과에 근거하여 새로운 침강속도 곡선식을 개발하였다.

기존의 침강속도 경험식은 응집침강 영역과 간섭침강 영역에 각기 다른 2개의 식으로 구성되어 있는 반면에, 새로이 개발된 침강속도 곡선식은 포물선형 함수식으로 간섭침강과 응집침강 전체 영역에서의 침강속도 변화를 1개의 단일식으로 표현할 수 있는 장점을 가지며, 측정결과를 비교적 잘 나타내는 것으로 나타났다. 또한 새로 개발된 침강속도 곡선식은 기존의 경험식에 비해 측정치로부터 계수산정의 편리함을 갖는다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(과제번호; 2001-2-31100-002-3)지원으로 수행되었습니다..

참고문헌

- [1] 이두곤, 1999, "Settling Column의 입자추적 측정치를 이용한 연안 퇴적물 입자의 연직이동 모델 연구", 한국해양환경공학회 논문집, 제2권 1호, 26~33.
- [2] 황규남, 2000, "새만금 갯벌퇴적물의 침강속도 산정을 위한 실험적 연구", 대한토목학회 논문집, 제20권 2-B호, 277~286.
- [3] 황규남 · 이재연 · 이재형, 2000, "새만금 갯벌 퇴적물 침강특성의 공간적 변화", 대한토목학회 학술발표회 논문집, 767~770.
- [4] 황규남 · 천민철 · 소상돈, 2001, "군산해역 갯벌 퇴적물의 침강특성 및 물리·화학적 특성 조사", 대한토목학회 창립50주년기념 초청 및 구두발표논문 초록집, 228.
- [5] Burt, T.N., 1986, "Field Settling Velocities of Estuary Muds", Estuarine Cohesive Sediment Dynamics, A.J. Mehta ed., Springer-Verlag, Berlin. pp. 126~150.
- [6] Hwang, K.-N. and Mehta, A.J., 1989, "Fine-Sediment Erodibility in Lake Okeechobee", Tech. Report, UFL/COEL-89/019, Coastal and Oceanographic Engineering Dept., Univ. of Florida, Gainesville, FL.
- [7] 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, CA.
- [8] Kynch, G.J., 1952, "A Theory of Sedimentation", Transactions of the Faraday Society, Vol. 48, 166~176.
- [9] Mehta, A.J., 1986, "Characterization of Cohesive Sediment Properties and Transport Processes in Estuaries", In Estuarine Cohesive Sediment Dynamics, A.J. Mehta ed., Springer-Verlag, Berlin, 290~325.

- [10] Mehta, A.J., 1988, "Cohesive Sediments in Estuarine Environment", Invited Contribution to AGU Chapman Conference, Bahia Balanca, Argentina.
- [11] Ross, M.A., 1988, "Vertical Structure of Estuarine Fine Sediment Suspensions", Ph.D. Dissertation, Univ. of Florida, Gainesville, FL.
- [12] van Leussen, W., 1988, "Aggregation of Particles, Settling Velocity of Mud Floccs - A Review", Physical Processes in Estuaries, J. Dronkers and W. van Leussen, eds., Springer-Verlag, Berlin, pp. 347~403.
- [13] van Olphen, H., 1963, "An Introduction to Clay Colloid Chemistry", Interscience Publishers, NY.
- [14] Wolanski, E., Aseda, T., and Imberger, J., 1989, "Mixing Across a Lutocline", Limnology and Oceanography, Vol. 34, 931~938.