

준설토의 침강특성에 관한 실험적연구

An Experimental Study on Characteristics of Sedimentation of Dredged Soil

유 남 재* 이 종 호** 전 상 현*** 이 종 용****
Yoo, Nam-Jae Lee, Jong-Ho Jun, Sang-Hyun Lee, Jong-yong

Abstract

Column tests in the laboratory were performed to investigate characteristics of settling process of dredged soil sampled from in-situ. Test results were analyzed by using the existing theories on discrete settling and hindered settling.

From column tests of monitoring the interface with time, settling was found to be a linear process with time and the settling rate was increased with initial water content of slurry. The settling rate was also observed to decrease with increasing initial height of slurry.

Most of settling process were composed of flocculation, hindered settling and self-weight consolidation. On the other hands, flocculation of soil during settling was observed and it was found that the size and density of flocculated particles could be analyzed by using the method proposed by Richardson and Zaki.

키워드 : 준설토, 컬럼실험, 방해침강, 응집

Keywords : dredged soil, column test, hindered settling, flocculation

1. 서론

1.1 연구배경 및 목적

산업을 위주로 대형화된 토목공사가 진행되고 있으며, 특히 임해지역의 개발이 계속적으로 증가하는 추세에 있다. 이에 따라 새로운 대단위 공업단지 등의 조성을 위한 많은 해안 매립사업이 유용하게 채택되고 있다.

바다의 공유 수면을 매립하기 위한 방법에는 매립지 인근 산지의 토석을 성토용 재료로 사용하는 방법과 대형 준설선 등을 이용하여 바다 밑의 준설토를 굴착, 운반하여 매립하는 방안 등이 있다. 대규모 매립공사의 경우 해면매립에 필요한 매립

토의 물량이 방대하여 주위에서 충분한 양의 매립용 토사를 확보하기가 어려운 실정으므로 해저의 퇴적층의 해성점토를 준설 투기하여 연약지반처리를 통해 지반개량함으로써 매립토 부족량을 준설토로 대체하는 경우가 많다. 또한 준설은 일반적으로 수면하의 토사를 굴착하는 공사로서 굴착과 매립을 병행할 수 있으며 또한 최근 국내 매립기술과 장비의 발달되어 준설토를 이용한 매립이 많이 활용되고 있는 실정이다.

이러한 준설토를 이용하여 매립지를 조성함에 있어서는 고함수비를 갖는 흙의 제반 문제를 파악함이 매우 중요하다. 고함수비를 갖는 흙은 침강과 압밀 과정을 통하여 안정을 갖게 된다. 이러한 고함수비의 준설토에 대한 거동 중 압밀에 대한 연구는 실험적 연구와 이를 뒷받침하는 이론적 연구가 병행되면서 상당한 연구가 진행되어 왔다. 침강에 대한 연구는 최근들어 진행되고 있으나 아직

* 강원대학교 토목공학과 교수, 공학박사

** 강원대학교 토목공학과, 공학박사

*** 강원대학교 토목공학과, 박사과정

**** 강원대학교 토목공학과, 공학석사

까지 미비한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 실제 매립에 사용되는 준설토의 침강현상을 분석하기 위하여 실험을 수행하고, 기존의 이론과 비교 분석하여 침강특성에 대한 연구를 실시하였다.

1.2 연구동향

각종 침강 형태에 대한 연구는 Stokes(1851)의 단립자 자유 침강 이론 이래로 Kynch(1952), Richardson & Zaki(1954), Michaels & Bolger(1962), Work & Kohler(1976)등 초기에는 주로 화학공학 분야에서 연구가 진행되었다.

점토의 침강거동에 관한 연구는 Kynch(1952)가 침강속도는 경계면의 국부적인 입자밀도에 의해서 결정된다는 가정을 근간으로 하여 전개한 연속방정식을 토대로 방해침강(Hindered Settling)이론을 제안하였다. 이후 McRoberts & Nixon(1976)은 Kynch의 방해침강 이론을 흙에 적용함으로써 본격적인 지반공학적인 개념으로 토립자의 침강거동을 해석하기 시작하였다. 농도가 높은 경우 입자분리가 발생하지 않는다는 사실을 근간으로 하여 등경입자에 대한 Kynch의 가정을 수정하여 자연 실트와 가는 모래로 된 현탁액에 방해침강 이론을 적용하여 해석하였다. Imai (1980, 1981)는 액체상태의 점토가 침강하는데 4가지 형태를 갖는다고 제안하였으며, Mikasa(1963), Keshian, Ladd & Olson (1977), Parker & Kirby(1977), 松尾(1977), Been & Sills(1981)등에 의하여 점성토를 대상으로 다양한 조건에서의 침강에 대한 연구가 진행되어 왔다.

Been(1980)은 X-ray를 이용하여 현탁액의 밀도분포의 변화를 실험적으로 관찰하였다. 또한, 압밀과 방해침강이론이 동일한 기본원리에서 유도됨을 제안하였는데, 방해침강은 유효응력이 영인 상태의 압밀이론에서 출발함을 증명하였다. Been & Sills(1981)은 현탁액과 큰 변형이 수반되는 퇴적층 사이에 전이구간이 존재하고 미소하나마 유효응력의 존재를 확인하였다.

Tan(1990)은 Kynch의 방해침강이론을 수정하여 표면침강-시간 곡선으로부터 투수계수-간극비 관계를 구하였고, α 계수를 도입하여 슬러리의 투수계수에 영향을 주는 초기상태에 대해 연구하였다.

국내에서는 정인준과 유진선(1979)이 준설토의 침강과 압밀침하에 대하여 실내실험과 Mikasa(1963)의 이론을 통하여 그 현상을 고찰하였고, 김수삼(1983)은 서해안 실트를 이용하여 해성토의 초기합수비에 따른 침강특성의 변화와 자중압밀 발생영역 및 침강과 퇴적의 상호관계를 규명하였다. 김윤승(1998)은 침강-압밀이론을 접목시킨 유한요소해석을 이용한 단일 수치해석 프로그램을 개발하여 기존의 여러 시험결과와 비교하였다. 한영철,

송정락(1992)은 군산지역의 준설토를 통해 투입구로부터의 거리에 따른 입도분포특성을 조사하였다.

한편, 박경호등(1988)은 고농도 응집 현탁액의 침강거동에 대한 실험적 이론적 연구를 통하여 응집체의 크기 및 비중을 수정된 Richardson-Zaki 식을 이용하여 구하는 방법을 제시하였다.

1.3 연구내용 및 범위

준설토는 초기에 토립자와 물이 혼합된 상태에서 침강이 발생한다. 이때 입자의 침강에 소요되는 시간은 실트질 이상 입자의 경우 입자가 비교적 크고 구형이므로 Stokes(1851)의 법칙에 의하여 그 침강특성을 대략적으로 예측할 수 있으나, 점토질 입자의 경우 입자가 작고 판상이며 전하를 띄게 되어 이 때의 침강속도는 Stokes의 법칙에 의한 단립침강이론과 달라지게 된다. 또한 입자간의 응집과 염분도와 같은 현탁액의 특성에 따라서도 침강속도는 변하게 된다. 따라서 점토질 입자의 침강에 소요되는 시간에 대한 기존의 연구는 주로 실험을 통하여 결정되어 왔다.

본 연구에서는 실제 준설매립공사에 사용된 해성 준설토인 부산 가덕 신항만의 준설토와 여천 확장 단지의 준설토를 각각 현장에서 채취하여 실험을 실시하였다.

실험은 먼저 각 시료에 대해 기본물성시험을 실시하여 물리적 성질을 조사하였으며, 침강시험은 메스실린더와 1m 소형 Column, 그리고 2m 대형 Column을 이용하여 초기농도와 초기높이 등을 매개변수로 하여 침강거동을 분석하였다.

이러한 실험을 통하여 도출된 결과를 기존의 식과 비교 분석하였다. 박경호(1988)가 제시한 방법에 따라 준설토의 침강과정에서 응집된 Floc 크기 및 밀도를 간접적으로 분석함으로써 단립침강이론의 적용을 고찰하여 보았다. 또한 침강거동을 분석하기 위해 McRoberts & Nixon(1976)이 제안한 Particle Flux Plot를 적용하여 준설토의 침강현상에 대하여 검토하였다.

2. 이론적 배경

2.1 개요

침강 현상은 현탁액 내 입자들의 유체에 대한 상대적인 운동을 말한다. 일반적으로 수중에 토립자가 넓은 간격으로 섞여있고 부력을 받아 부유하는 상태의 액체를 현탁액이라 정의하고, 이때 현탁액의 유효응력은 '0'인 상태가 된다.

준설토 등과 같이 지반공학에서 실제 당면하는 침강 현상은 고농도의 현탁액에서 발생하기 때문에 토립자 사이의 상호작용에 의해 영향을 받게 된다. 이러한 침강 형태는 Kynch(1952)에 의해 방해침강이론으로 새롭게 제안됨으로써 고농도 현탁액의 침강현상을 해석할 수 있게 되었다.

2.2 단립침강이론을 이용한 Floc의 크기산정

Stokes(1851)가 제안한 단립침강식과 이를 농도에 따라 고려할 수 있도록 수정한 식들은 일반적으로 간단하게 사용할 수 있다. 그러나 준설토를 구성하고 있는 연약점토에서는 이 식의 매개변수가운데 입자의 크기를 쉽게 선택할 수 없다. 즉, Imai(1980)가 제안한 것처럼 준설토는 침강시 초기에 응집단계를 거치면서 Floc을 형성하게되고 침강은 형성된 Floc에 의해 발생하는 현상이므로 단립입자의 침강속도식을 적절히 적용하기 위해선 그 Floc의 크기를 적절히 평가하는 것이 중요하다.

박경호등(1988)은 수정된 Richardson & Zaki(1954)식을 이용하여 응집체의 크기 및 비중을 구하는 방법에 대하여 제안하였다.

일반적으로 농도가 낮은 현탁액에서 사용되는 Richardson & Zaki식을 고농도의 현탁액에서 적용하기 위해 Scott(1966)은 Richardson & Zaki식을 다음과 같이 수정하였다.

$$v^{1/4.65} = v_0^{1/4.65}(1 - k_f C) \quad (1)$$

여기서, v 는 현탁액 경계면의 침강속도(m/sec), v_0 는 Stokes가 제안한 침강속도(m/sec), k_f 는 건조된 입자의 단위 중량당 Floc의 부피(m^3/kg), C 는 입자의 농도(kg/m^3), $k_f C$ 는 Floc의 부피비이다.

식(1)을 사용하기 위해 농도, C 와 침강속도, $v^{1/4.65}$ 의 관계를 도식한 후, 이 자료를 직선식으로 회귀 분석하여, 그 기울기와 절편값을 얻음으로써 v_0 와 k_f 를 계산하게 된다. 식 (2)는 Floc의 크기로 계산되어지는 단립침강이론식이다.

$$v_0 = \frac{d_f^2(\rho_f - \rho_l)g}{18\mu_l} \quad (2)$$

여기서, d_f 는 Floc의 유효직경, ρ_f 는 Floc의 밀도, ρ_l 은 액체의 밀도, μ_l 는 액체의 점성계수이다.

입자의 밀도와 Floc의 밀도와와의 관계는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$(\rho_f - \rho_l) = \frac{(\rho_p - \rho_l)}{k_f \rho_p} \quad (3)$$

여기서, ρ_p 는 입자의 밀도이다.

그러므로, 식 (3)를 식 (2)에 대입시키면 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$v_0 = \frac{d_f^2(\rho_p - \rho_l)g}{18\mu_l k_f \rho_p} \quad (4)$$

식(4)로부터 v_0 와 k_f 의 결과를 가지고 Floc의 유효 직경을 구할 수 있다.

2.3 방해침강이론

농도가 높은 경우에는 입자들 사이의 상호작용이 커져 여러 가지 크기와 모양의 미소 입자들이 응집된 후 한 덩어리가 되어 동일한 속도로 침강

함으로써 분리 현상이 거의 일어나지 않게 된다. 이와 같은 침강현상을 방해침강(Hindered Settling)이라고 부른다. 이를 방해침강이라 부르는 이유는 한 입자의 침강이 다른 입자들에 의해 방해받기 때문인데, 이웃된 입자들의 침강에 의해 생긴 물의 흐름 때문에 저항력이 증가하여 침강속도가 감소하게 된다(김윤승, 1998).

이러한 Kynch(1952)에 의한 방해침강 이론은 크기가 유사한 토립자가 분산되어 침강되는 이론으로, 임의의 토립자의 침강 속도는 단지 근처에 있는 토립자의 국부적인 농도의 함수라고 가정하였다. 또한, 현탁액 내의 임의의 단위면적을 단위 시간에 통과하는 입자의 수를 입자의 유출(Solid Flux)이라고 하였다.

McRoberts & Nixon(1976)는 이를 흙으로 확장하였고, 농도를 토립자의 무게에 대한 단위 부피의 비로 정의하여 토립자의 속도보다는 임의의 점에서의 속도에 대해 고려할 수 있도록 하였다. 본 연구에서는 후자의 개념으로 접근하였다.

단위 부피당 토립자의 무게로 정의한 농도, C 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C = (1 - n) \rho_s \quad (5)$$

여기서, n 은 간극률이다.

Kynch의 방해침강 이론에 대한 기본 가정에 의해, 침강속도는 농도의 함수로 나타낼 수 있다.

$$v_s = v_s(C) \quad (6)$$

흙 입자의 유출(solid flux), S 는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$S = C v_s \quad (7)$$

토립자의 연속방정식은 다음식과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial S}{\partial x} = 0 \quad (8)$$

상기식은 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + V(C) \frac{\partial C}{\partial x} = 0 \quad (9)$$

여기서,

$$V(C) = \frac{dS}{dC} \quad (10)$$

식 (9)는 전형적인 quasi-linear first-order hyperbolic differential equation이다. 이 식의 특징은 식 (10)에 의해 주어진 기울기를 가지게 되는 것이다. 그러므로, 식 (10)에서 나타난 각 직선을 따라, 일정한 농도를 가지게 된다(Tan, 1990).

McRoberts & Nixon(1976)은 현탁액내에서의 일반적인 흙 입자의 유출을 다음의 식으로 나타내었다.

$$\frac{S}{S_m} = \frac{C}{C_m} \left[\frac{G_s/C_m - C/C_m}{G_s/C_m - 1} \right]^r \quad (2.11)$$

여기서, S 는 흙 입자의 유출, S_m 은 침강종료시

흙 입자의 유출, C_m 은 침강종료시 흙 입자의 농도, r 은 실험에 의한 구해지는 상수이다.

이 식을 이용하기 위해 현탁액의 농도를 간극률 n 으로 표현하면, 다음과 같다.

$$v = v_0 n^r \quad (12)$$

이러한 방해침강 이론을 바탕으로 실험에 의해 구한 S와 C와의 곡선은 그림 1과 같은 Particle Flux Plot의 형태로 나타난다.

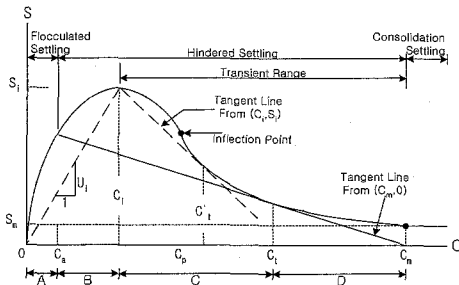


그림 1. 방해침강 이론에 의한 침강형태 (McRoberts & Nixon, 1976)

3. 실험

우리나라에 있어 해성점토는 남서해안에 걸쳐 광범위하게 분포되어 있으며, 부산, 마산, 여천, 목포, 군산, 아산만, 울진 일대는 준설에 의한 지반의 매립 가능성이 높은 지역이다. 본 연구에서는 이들 지역 중에서 부산 가덕 신항만 준설토(가덕시료)와 여천 확장 단지 준설토(여천시료)를 각각 현장에서 채취한 시료를 사용하여 연구를 진행하였다.

가덕시료와 여천시료의 기본물성을 실시하고 그 실험 결과를 표 1에서 정리하였으며, 입도분포곡선을 그림 2과 그림 3에 각각 나타내었다.

물성 시료	비중 (Gs)	액성한계 (LL)	소성한계 (PL)	소성지수 (PI)	통일 분류법
가덕점토	2.71	39.58%	21.32%	18.26%	CL
여천점토	2.78	47.88%	25.45%	22.43%	CL

표 1. 기본물성실험결과

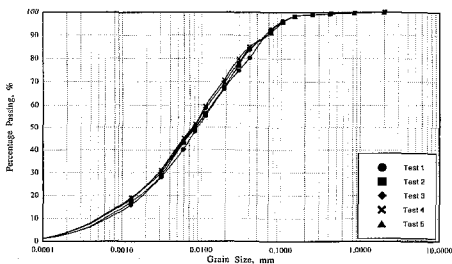


그림 2. 가덕점토의 입도분포곡선

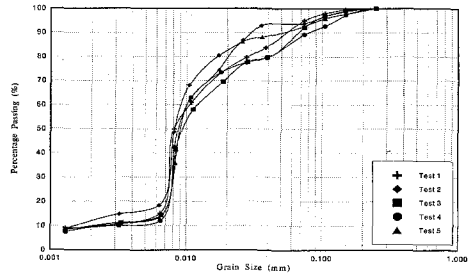


그림 3. 여천점토의 입도분포곡선

침강실험은 함수비와 초기높이를 변화시키면서 부산신항만의 가덕시료에 대해서는 50cm 매스실린더와 1m 소형 Column과 2m 대형 Column을 이용한 침강실험을 수행하였으며, 여천시료에 대해서는 1m 소형 Column 실험과 2m 대형 Column 실험을 수행하였으며, 이를 표 2에 정리하였다.

	초기높이 (cm)	초기함수비(%)				
		500	700	1000	1400	2000
가덕 시료	25	○	○	○	○	○
	50	○	○	○	○	○
	75	○	○	○	○	○
	90	○	○	○	○	○
여천 시료	25	○	○	○	○	○
	50	○	○	○	○	○
	75	○	○	○	○	○
	90	○	○	○	○	○

표 2. 1m Column 실험조건

4. 실험결과

4.1 개요

본 장에서는 가덕시료 및 여천시료 각각에 대해 매스실린더 및 소형 Column과 대형 Column 실험 결과로부터 침강속도를 구하여, 초기함수비에 따른 침강속도, 초기높이에 따른 침강속도와와의 관계를 분석하였다.

이러한 결과를 단립침강식을 이용하여 준설토 침강시의 초기에 응집과정에 의해 형성되는 Floc의 크기와 밀도를 간접적인 방법으로 구하였다. 또한 이 결과를 이용하여 기존의 몇가지 단립침강 이론식으로부터 다시 침강속도를 구하여 실험결과와 비교 분석하였다.

준설토의 방해침강형태를 고찰하기 위해 McRoberts & Nixon(1976)이 제시한 Particles Flux Plot 곡선과 침강시의 초기 간극률과 최종 간극률과의 관계를 이용하여 비교 분석하였다.

4.2 육안으로 관찰한 침강현상

본 연구에서는 여러 침강실험을 실시하면서 실제 육안을 통하여 침강현상에 대해 관찰하였다.

먼저, 침강실험을 실시하기 전에 전치나 Air Compressor를 통하여 충분히 교반을 시킨 다음 침강실험이 시작되면 초기에는 시료가 침강되기 전에 침강용기 상부에서 시료가 교반되는 것을 관찰할 수 있었다. 중력방향으로 내려가는 토립자뿐만 아니라 상승하거나 불규칙하게 운동하는 토립자들을 쉽게 관찰할 수 있었다. 김수삼(1983)은 이 과정을 Flocculation이 발생하는 현상이라고 제시하였다. 본 연구에서도 계면에 형성되는 Floc을 관찰할 수 있었으며, 형성시간이 함수비에 따라 다르게 나타났는데, 고함수비의 경우가 저함수비보다 더 지연된 시간으로 나타나는 것을 관찰할 수 있었다. 상등액 역시 고함수비의 경우 좀 더 밝은색으로 형성됨을 관찰하였다.

이러한 Floc의 형성시간은 Mikasa(1963)가 제안한 초기함수비에 대한 현탁액의 투수성이나 Imai(1981)가 제안한 응집단계(Flocculation Stage) 또는 Han(1989)이 제안한 고농도 부유물의 계면형성기구로 설명될 수 있다.

계면이 형성된 직후부터는 시간에 따른 계면의 침강을 확연히 관찰할 수 있었다. 침강용기 상부의 계면은 침강에 의해 하강하고, 침강용기 하부에서는 농도가 큰 퇴적면이 형성됨을 육안으로 관찰할 수 있었다.

현탁액이 침강하는 동안에도 많은 입자들이 중력방향으로 하향만을 하지 않고, 상향으로 움직이거나 회전하는 현상이 나타났다. 하지만 전체적인 계면은 서서히 하강함을 볼 수 있었다. 이러한 현상은 간극수의 배출을 중심으로 압밀현상과 비교하였을 때 근본적으로 상이한 현상이 아니라고 판단된다.

4.3 침강속도 분석

시간-침하곡선으로 분석한 각 초기함수비에 따른 침강속도의 관계를 메스실린더와 소형 Column, 대형 Column 각각에 대해 그림 4~6에 나타내었다. 침강속도는 진술한 바와 같이 시간변화에 따른 계면고의 변화에 대한 결과에서 침강영역의 기울기로 구한 것이다.

침강용기의 크기나 초기높이에 관계없이 모두 초기함수비가 증가할수록 즉, 초기 농도가 감소할수록 침강속도가 증가함이 잘 나타나 있다. 메스실린더의 경우 함수비가 1000%의 경우까지 거의 선형적으로 증가하다가 함수비 1200%에서 침강속도의 기울기가 변함을 관찰할 수 있다. 이는 Kynch(1952)가 제안한 침강속도는 단지 국부적인 농도의 함수라는 이론만으로 침강속도를 설명하는데 부족하다는 사실을 보여준다. 즉, Tan(1990)등의 제안처럼 침강속도는 농도뿐만 아니라 초기함

수비와 초기 높이의 영향을 받는다는 것을 알 수 있다. 특히, 대형 Column의 그림 4.15의 경우에는 초기함수비에 따른 침강속도가 저함수비에는 작게 관찰되다가 함수비가 증가함에 따라 침강속도가 비선형적으로 증가하는 것을 관찰할 수 있다. 추후 연구에서 다양한 함수비에 대한 대형 Column 침강실험을 실시하면 이러한 경향을 좀 더 확연히 관찰할 수 있을 것이라 판단된다.

1) 메스실린더

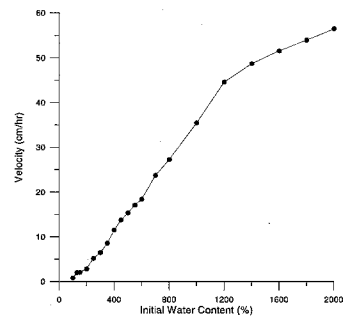


그림 4. 초기함수비에 따른 침강속도

2) 소형 Column

(1) 가덕시료

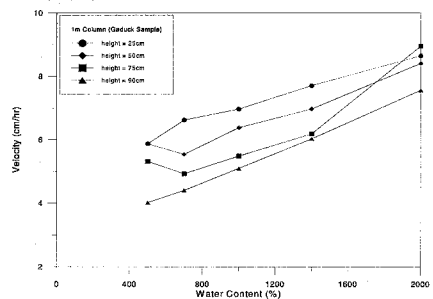


그림 5. 초기함수비에 따른 침강속도

(2) 여천시료

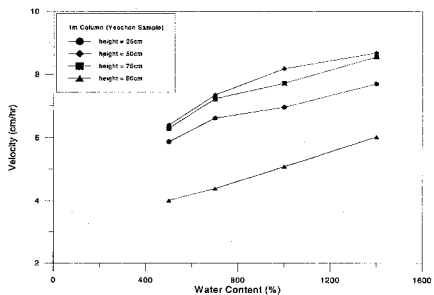


그림 4.6 초기함수비에 따른 침강속도

3) 대형 Column

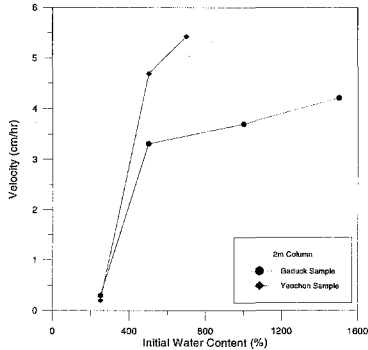


그림 6. 초기함수비에 따른 침강속도

(2) 초기높이에 따른 침강속도

초기높이에 따른 침강속도에 대해 분석하기 위해 소형 Column의 가덕시료에 대해 초기함수비 500, 700, 1000, 1400, 2000%일 때의 초기높이-침강속도의 관계를 그림 7에 나타내었다.

Kynch(1952)나 Mikasa(1963)에 의하면 경계의 침강 속도는 초기높이와 무관하다고 하였다. 하지만 본 연구에서 수행한 실험결과에서는 초기높이가 증가할수록 침강속도가 감소함을 나타냈다. 이는 침강과정중 하부에서 퇴적된 토립자의 자중압 밀이 발생되어 초기높이에 따라 계면침하에 영향을 미치기 때문이라고 판단된다.

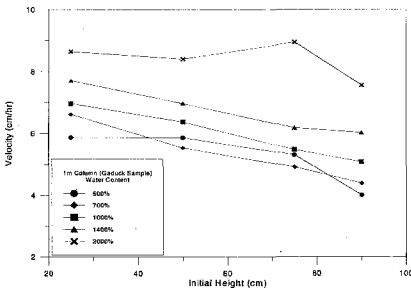


그림 7. 초기높이에 따른 침강속도

4.4 단립침강 분석

박경호 등(1988)이 제시한 방법으로 가덕시료의 Floc의 크기 및 밀도를 분석하여 보았다.

먼저, 실험에 의해 구한 초기함수비-침강속도와 의 관계를 초기농도-침강속도와의 관계로 나타내었다. 이 때 초기농도는 식 (5)이용하여 구하였다. 침강속도를 1/4.65로 제곱한 후 농도를 가로축, $v^{1/4.65}$ 를 세로축으로 도시하였다. 이렇게 구한 자료의 선형 회귀분석을 통하여 구한 식을 식 (1)과 비교하여 $v^{1/4.65}$ 와 k_f 를 구하였다. 이 결과를 식 (3)과 (4)에 대입하여 d_f 와 ρ_f 즉, Floc의 크기와 밀도를 구하였다.

이렇게 구한 결과를 그림 7과 표 3에 나타내었다.

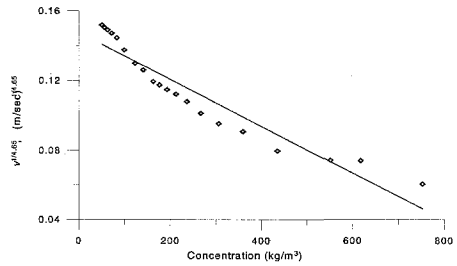


그림 8. 침강농도와 $v^{1/4.65}$ 의 관계

Parameters	$v_0^{1/4.65}$	$k_f(\text{m}^2/\text{kg})$	$\rho_f(\text{kg}/\text{m}^3)$	$d_f(\text{mm})$
Value	0.14751	9.12×10^{-4}	1721.97	0.02127

표 3. 수정된 Richardson & Zaki식으로 구한 Floc의 크기 및 밀도

박경호 등(1988)에 의하면 이와 같은 방법으로 구한 고농도 응집체의 밀도와 크기가 실제와 상당히 유사하다고 설명하였다. 추후 연구에서는 SEM 등의 장비를 이용하여 실제 Floc의 크기와 비교함으로써 좀 더 구체적인 연구가 진행되어야 할 것이다.

4.5 방해침강 분석

Kynch(1952)가 제안하고 McRoberts & Nixon (1976)이 흙에 대해 적용한 Particle Flux Plot 곡선에 의한 침강 형태의 분석은 방해침강에 대한 이론적인 해석방법으로 제시할 수 있다.

McRoberts & Nixon(1976)에 의하면 초기농도를 파악하고 실험에 의해 간섭침강의 침강속도가 주어지면 그림 2.2에 도시한 Particle Flux Plot에 의해 침강 모드를 정할 수 있다고 설명하고 있다. Particle Flux Plot에 사용되는 계면의 침강속도에 대해 Richardson & Zaki(1954)관계를 적용시켜 농도와 토립자의 유출속도, Flux와의 관계를 성립한다.

본 연구에서는 준설토의 침강특성을 분석하기 위해 먼저, 초기간극률, n_0 와 실험에 의해 측정된 침강속도와와의 관계를 양대수 눈금에 도시하였다. 이러한 관계에 대해 선형의 회귀분석을 통해 간극률과 침강속도와와의 관계를 구하였다.

이러한 관계를 이용하여 식 (11)의 v_0 와 r 을 산정한 후, 침강종료시 토립자의 유출, S_m 과 침강종료시 흙 입자의 농도, C_m 을 측정하고 이를 식 (2.12)에 적용하여 Particle Flux Plot을 구하였다.

가덕시료의 소형 Column 침강실험의 Particle Flux Plot의 그림 9~12는 그림 1의 B구간의 형태를 나타낸다. 즉, 침강형태가 초기의 방해침강에 해당됨을 확인할 수 있다. 또한 대형 Column 침강

실험의 경우는 그림 13에 나타내었다. 그림 2.2와 비교해 보면, 침강이 방해침강 전반에 대하여 나타나고 있음을 알 수 있다.

1) 가덕시료(소형 Column)

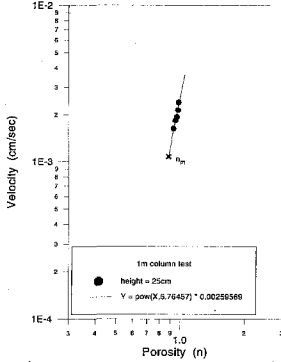


그림 9. McRoberts & Nixon 관계
(가덕시료, 1m Column, 높이:25cm)

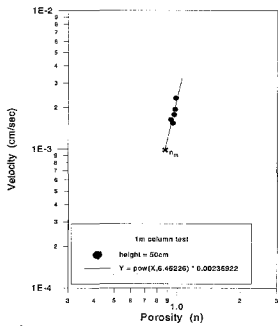


그림 10. McRoberts & Nixon 관계
(가덕시료, 1m Column, 높이:50cm)

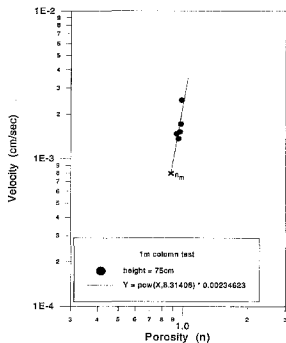


그림 11. McRoberts and Nixon Relation
(가덕시료, 1m Column, 높이 : 75cm)

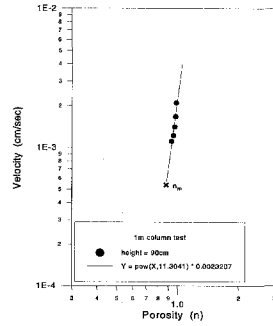


그림 12. McRoberts and Nixon Relation
(가덕시료, 1m Column, 높이 : 90cm)

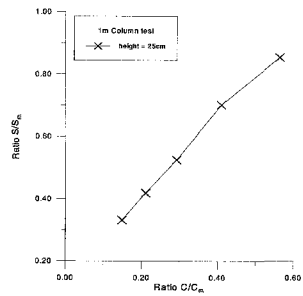


그림 13. Particle Flux Plot
(가덕시료, 1m Column, 높이 : 25cm)

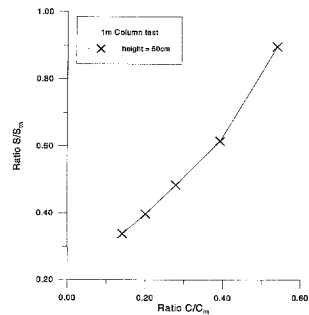


그림 14. Particle Flux Plot
(가덕시료, 1m Column, 높이 : 50cm)

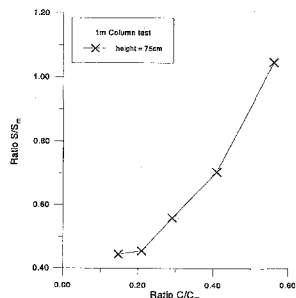


그림 15. Particle Flux Plot
(가덕시료, 1m Column, 높이 : 75cm)

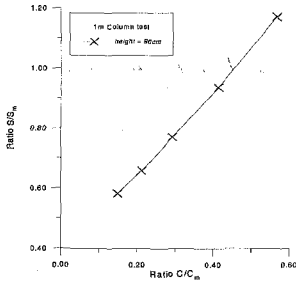


그림 16. Particle Flux Plot
(가덕시료, 1m Column, 높이 : 90cm)

2) 가덕시료(대형 Column)

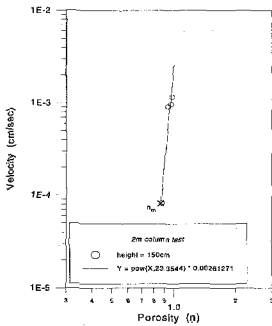


그림 17. McRoberts and Nixon Relation
(가덕시료, 2m Column)

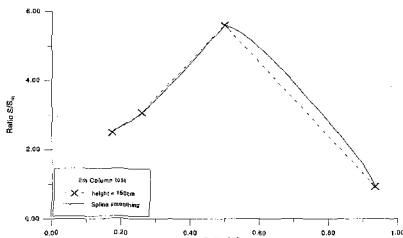


그림 18. Particle Flux Plot (가덕시료, 2m Column)

이와같이 준설토의 침강실험 결과는 McRoberts & Nixon(1976)이 제안한 방해침강의 형태에 잘 부합됨을 알 수 있다. 그러므로 준설토의 침강형태는 초기에는 응집에 의하여 Floc이 형성되고, 이 Floc들이 침강중에 다른 Floc에 의해 방해됨을 받는 방해침강의 형태임을 확인할 수 있었다. 또한 대형 Column이 방해침강을 보다 더 잘 나타남을 알 수 있었다.

McRoberts & Nixon(1976)은 침강 초기의 간극률과 침강 종료시의 간극률을 비교함으로써 침강중 압밀이 발생하고 있음을 간접적으로 설명하였다. 이는 Imai(1981)가 제안한 그림 2.1에서 상부에는 침강이 발생하고 하부에는 압밀이 발생하는 침

강단계(Settling Stage)로도 설명할 수 있다.

가덕시료에 대해 소형 Column과 대형 Column의 침강 실험 결과를 이용하여 침강 초기 간극률, n_0 와 침강 종료시의 간극률, n_m 과의 관계를 그림 19~20에 나타내었다.

실험결과 구해진 초기간극률과 최종간극률의 관계는 선형적으로 나타나지 않았다. 이는 침강과정에서 상부의 계면침강뿐 아니라 하부의 자중압밀에 의해 침강 종료시의 간극률이 일정하게 형성되지 않는다는 것을 간접적으로 확인할 수 있다.

위와 같은 결과들은 보았을 때, 준설토의 침강기구는 Imai(1981)가 제안한 그림 1의 침강형태 즉, 초기의 응집단계를 지나 계면의 침강이 시작되면서 하부에서는 압밀이 진행되는 침강단계를 거쳐 침강이 종료되면서 압밀단계에 접어들게 되는 형태가 나타나고, 특히 침강은 방해침강의 형태와 잘 부합됨을 알 수 있었다.

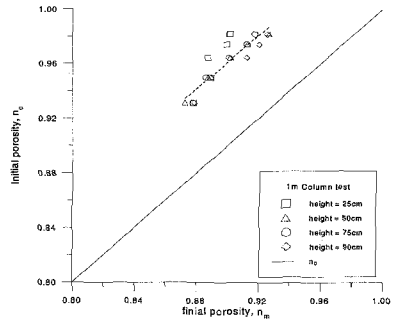


그림 19. 초기간극률과 최종간극률의 관계
(가덕시료, 1m Column)

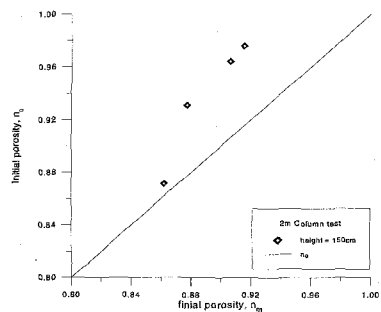


그림 20. 초기간극률과 최종간극률의 관계
(가덕시료, 2m Column)

5. 결론

본 연구에서는 준설토의 침강특성에 대하여 고찰하고자 실제 준설매립에 사용된 가덕시료와 여천시료를 현장에서 채취하여 매스실린더와 소형 Column, 그리고 대형 Column을 이용하여 침강실

험을 수행하였다. 이 실험결과를 단립침강이론과 방해침강이론에 적용하여 준설토의 침강형태를 분석하였다. 이러한 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 현탁액의 침강시험을 통하여 시간에 따른 계면침하를 관찰한 결과 침강부분이 선형적으로 나타났으며, 초기합수비가 증가할수록 즉, 초기농도가 감소함에 따라 침강속도가 증가하는 경향을 확인하였다.

2. 초기높이와 침강속도와의 관계는 초기높이가 클수록 침강속도가 감소하는 경향을 나타내며, 이를 통하여 침강과정 중 하부의 퇴적층에서 압밀이 발생하는 것을 알 수 있었다.

3. 침강시험에서의 육안관찰을 통하여 침강유기 계면에서 형성되는 Floc을 확인할 수 있었으며, Richardson & Zaki식을 이용하여 Floc의 크기와 밀도를 분석할 수 있었다.

4. 간접적인 방법을 통하여 Floc의 크기와 밀도를 구함으로써 준설토의 침강에서도 간단한 단립침강식을 사용하여 대략적인 침강속도를 분석할 수 있음을 알 수 있었다.

5. 침강결과를 Particles Flux Plot에 적용시켜 본 결과, 준설토의 침강이 전형적인 방해침강형태로 나타나고 있음을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

[1] Been, K. (1980), "Stress Strain Behavior of a Cohesive Soil Deposited Under Water", Doctor of Philosophy, University of Oxford.

[2] Been, K., Sills, G. C. (1981), "Self-weight Consolidation of Soft Soils : An Experimental and Theretical Study", *Geotechnique*, Vol. 31, No. 4, pp. 519-535.

[3] M. Y., Han (1989), "Mathematical Modeling of Heterogeneous Flocculent Sedimentation", Doctor of Philosophy, University of Texas at Austin.

[4] Imai, G. (1980), "Settling Behavior of Clay Suspension", *Soils and Foundations*, Vol. 20, No. 2, pp. 84-89.

[5] Imai, G. (1981), "Experimental Studies on Sedimentation Mechanism and Sediment Formation of Clay Material", *Soil and Foundations*, Vol. 21, No. 1, pp. 7-20.

[6] Keshian, B. Jr., Ladd, C. C., and Olson, R.

E. (1977), "Sedimentation-Consolidation Behavior of Phosphatic Clays", *Geotechnical Practice for Disposal of Solid Wasted Materials, ASCE, Specialty Conference, June*, pp. 188-209.

[7] Kynch, C. J. (1952), "A Theory of Sedimentation", *Trans. Faraday Soc.* 48, pp. 166-177.

[8] McRoberts, E. C., and Nixon, J. F. (1976), "A Theory of Soil Sedimentation", *J. of Can. Geotech.*, Vol. 13, pp. 294-310.

[9] Michaels, A. S., Bolger, J. C. (1962), "Settling Rates and Sediment Volumes of Flocculated Kaolin Suspensions", *I and EC Fundamentals*, Vol. 1, No. 1, pp. 24-33.

[10] Mikasa, M. (1963), "The Consolidation of Soft Clay - A Comparison between Two Theory and Its Application", Reprint from Civil Engineering in Japan, *JSCE*, pp. 21-26.

[11] Monte, J. L., Krizek, R. J. (1976), "One-dimensional Mathematical Model for Large Strain Consolidation", *Geotechnique*, Vol. 26, No. 3, pp. 495-510.

[12] Parker, W. R., Kirby, R. (1977), "Fine Sediment Studies relevant to Dredging Practice and Control", *Second International Symposium on Dredging Technology*, pp. 16-26.

[13] Raymond, N. Yong (1984), "Particle Interaction and Stability of Suspended Solids", *Sedimentation Consolidation Models*, ASCE, pp. 30-59.

[14] Richardson, J. F., Zaki, W. N. (1954), "Sedimentation and Fluidisation : Part I", *Trans. Instn. Chem. Engrs.*, Vol. 32, pp. 35-53.

[15] Stokes, G. G. (1851), "On the Effect of The Internal Friction of Fluids on The Motion of Pendulums", *Cambridge transaction*, 9.

[16] Tan, T. S., Yong, K. Y., Leong, E. C., and Lee, S. L. (1990), "A Study of Sedimentation of Clayed Slurry", *J. of Geotech. Eng.*, Vol. 16, No. 6, pp. 885-898.

[17] 김수삼 (1983), "한국서해안 (반월지역) 해성 토의 침강에 관한 실험적 연구", 공학박사 학위논문, 중앙대학교 대학원.

[18] 김윤승 (1998), "유한요소법을 이용한 침강-압밀 해석", 공학석사 학위논문, 한국과학기술원.

[19] 박경호, Uhlherr, P. H. T., and Andrews, J.

- R. G. (1988), “고농도 응집 현탁액의 침강거동”, *대한광산학회지*, Vol. 25, pp. 259-266.
- [20] 박경호, Uhlherr, P. H. T., and Andrews, J. R. G. (1988), “응집된 규사 현탁액의 침강거동”, *대한광산학회지*, Vol. 25, pp. 183-188.
- [21] 정인준, 유건선 (1979), “준설토의 기본적 실험연구”, *대한토목학회지*, 제 27권, 제 5호, pp. 55-64.
- [22] 한영철, 송정락 (1992), “군산지역 준설토의 퇴적특성”, *한국지반공학회 가을학술발표회 논문집*, pp. 61-64.
- [23] 松尾 (1977), “超軟弱粘土の舉動について”, *土と基礎*, pp. 129-133.