

## 비소성 준설토의 침강 및 퇴적 특성

### Characteristics of Settling and Sedimentation for a Non-plastic Dredged Soil

이 송\*<sup>1</sup> Lee, Song

심 민 보\*<sup>2</sup> Shim, Min-Bo

#### Abstract

Although many researches on the characteristic of settling and self-weight consolidation for a dredged clay with high plastic have been carried out at home and abroad, very few study for a non-plastic dredged soil has been progressed. Generally, a non-plastic dredged soil has different characteristics of its behavior in the phases of settling and sedimentation from a dredged clay with high plastic.

This paper presents some results of sedimentation and settling phenomena for a non-plastic dredged soil obtained from the laboratory settling tests. In addition to it, this paper analyzes sedimentation characteristics from observed interface by analyzing observed sediment height for a non-plastic dredged soil, and from the results of analysis, predicts the behavior characteristics for a non-plastic dredged soil. An analysis from the relationship between the initial and final sediment height, final sediment height and final interface has been made on the behavior for a non-plastic dredged soil.

#### 요 지

소성이 높은 고함수비를 갖는 준설토에 대한 침강 및 자중압밀 특성에 대한 연구는 국내외에서 활발하게 진행되고 있는 반면, 비소성 준설토에 대한 침강, 퇴적 특성에 대한 연구는 국내 뿐만 아니라 국외에서도 거의 진행되지 않고 있는 실정이다. 일반적으로 비소성 준설토는 침강 및 퇴적 단계에서 고소성의 준설토와 다른 거동 특성을 나타낸다.

본 논문에서는 비소성 준설토에 대한 실내 침강압밀시험을 실시하여 비소성 준설토의 퇴적 및 침강 현상을 제시하였다. 또한 퇴적이고 관찰이 이루어진 준설토에 대한 퇴적특성 분석을 통하여 계면고 관찰이 이루어진 준설토에 대한 퇴적 현상을 해석하였으며, 이를 통하여 비소성 준설토에 대한 침강 및 퇴적 거동을 예측하였다. 또한 초기 및 최종 퇴적이고에 대한 상관관계, 최종 퇴적이고 및 최종 계면고에 대한 상관관계 분석을 통하여 비소성 준설토의 거동 특성을 분석하였다.

**Keywords :** Non-plastic, Dredged soil, Sediment Formation Line, Transition water content

#### 1. 서론

현재 해안매립은 장비 발달로 인하여 바다에서 쉽게 구할 수 있는 준설토를 활용하는 경우가 많다. 압축성이 큰 고함수비 상태의 준설토는 장기간에 걸쳐 압밀이 이루어

어져 안정성이 떨어지며 준설토매립과정에 대한 단계 해석이 쉽지 않다.

국내 서해안은 남해안과 달리 대부분 실트질 또는 점토질 모래지반으로 형성되어 있어 해안 공간의 효과적인 활용을 목적으로 준설토를 사용하는 경우 고소성의 준설토

\*1 정희원, 서울시립대학교 토목공학과 교수

\*2 정희원, 서울시립대학교 토목공학과 박사과정

토보다는 비소성 준설토를 많이 사용하게 된다. 소성지수 20이상의 고소성 준설점토에 대한 침강 및 자중압밀 특성에 대한 연구는 국내는 물론 국외에서도 활발하게 진행되고 있으며, 이에 대한 해석 수준도 꾸준히 발달하고 있다 (Kynch, 1952 ; McRoberts & Nixon, 1976 ; Monte & Krizek, 1976 ; Been & Sills, 1981 ; Lin & Lohnes, 1981 ; 이송, 1994). 그러나 서해안 지역에서 활용 가치가 큰 비소성 준설토는 침강 및 퇴적 단계에서 준설점토와 다른 거동 특성을 갖음에도 불구하고, 이에 대한 침강 및 퇴적 특성에 대한 연구는 국내 뿐만 아니라 국외에서 거의 전무한 실정이다.

일반적으로 비소성 준설토에 대한 준설물량 산정은 경험적인 수치인 입경과 토질에 따른 유보율과 유실율 개념으로 대략적으로 계산하기 때문에 과대산정이나 과소산정하는 문제점을 지니고 있다. 또한 준설매립지반에서 침강거리를 산정하고, 준설토 투기 후 침강단계에 대한 특성을 분석하기 위하여 사용하고 있는 미공병단 제안방법 (US. ARMY, 1978)은 하부 퇴적고에 대한 고려없이 초기 간극비와 각종 계수를 이용하여 계면고를 예측하고, 이를 계면고 변화와 비교를 하기 때문에 육안으로 계면고 관찰이 어려운 초기 함수비를 갖는 비소성 준설토에 대해서는 적용성에 한계가 있다.

본 논문에서는 비소성 준설토에 대한 실내 침강압밀시험을 실시하여 비소성 준설토의 침강 및 퇴적 현상을 제시하였다. 또한 퇴적고 관찰이 이루어진 준설토에 대한 퇴적 특성 분석을 통하여 계면고 관찰이 이루어진 비소성 준설토에 대한 퇴적 현상을 해석하였으며 이를 통하여 비소성 준설토에 대한 침강 및 퇴적 거동을 예측하였다. 그리고 초기 및 최종 퇴적고, 최종 및 최종 계면고에 대한 상관관계

분석을 통하여 비소성 준설토의 거동 특성을 분석하였다.

## 2. 준설토의 특성

### 2.1 준설토의 침강 특성

준설점토가 매립지내로 투기된 직후의 침강특성은 초기 함수비, 염분과 흙의 농도 등에 따라 분산침강, 응집침강, 구간침강, 압밀침강 단계로 구분할 수 있다 (Imai, 1980). 초기 함수비가 매우 큰 경우에는 분산침강 형태를 지니며, 현탁액속의 토립자는 입자간의 상호작용을 받지 않는 자유침강이 발생한다. 자유침강이후 어느 정도 시간이 경과하면 토립자간의 상호작용으로 인해 플록을 형성하고, 다시 응집하여 토체를 구성하여 상부층에서 물과 준설토의 경계면이 생기면서 서서히 침강하기 시작한다.

진행적인 구간침강을 하는 준설점토의 침강 및 자중압밀에 대한 설명은 그림 1을 통하여 할 수 있다 (Imai, 1981). 침강과 동시에 하부에 퇴적이 발생하여 시간 경과에 따라 퇴적고 형성선(Sediment Formation Line, 이하 SFL)이 구성된다. 퇴적이 진행되면서 저부에서부터 압밀구역(Consolidation Zone)이 형성되며 이 구간의 함수비는 초기 함수비보다 작은 상태에 있다. 한편 상부에서는 경계면(Interface)이 발생하고 이 경계면과 하부 압밀구역사이 침강 구역(Settling Zone)이 형성되며 이 구역의 함수비는 하부의 침투력에 의하여 초기 함수비보다 큰 상태에 있다. 경계면이 시간 경과에 따라 감소한 후 그림 2와 같은 가상의 자중압밀 개시점에서 침강 및 압밀속도가 감소하기 시작한다.

고함수비의 준설점토는 투기 후에 침강의 단계를 거쳐 압밀단계로 진행되며 침강과 자중압밀 단계 구분은 매우

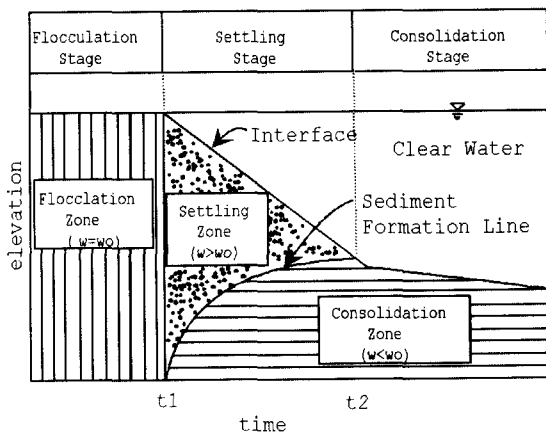


그림 1. Typical Sedimentation of Zone Settling

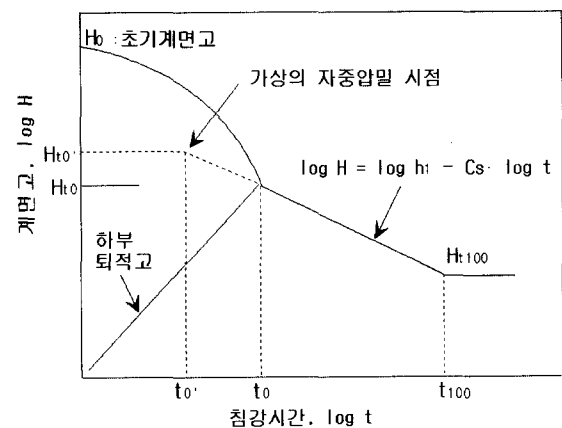


그림 2. Starting Point of a Modified Self-weight Consolidation

작은 유효응력을 결정하기 어려우므로 침강곡선에서 속도 변화로 간접적으로 판단한다. Yano는 logt-logH 곡선을 작도하여 일직선이 되는 부분의 시작점과 종점을 자중압밀 시 종점으로 결정하였다. 또한, 침강과정 중 자중압밀개시점으로 정의하는 상태는 존재하지 않으므로 전퇴적토층의 유효응력이 0인 상태에 있고 자중압밀이 개시되는 가상점을 상정하여 그 때의 침강시간을 그림 2와 같이 자중압밀개시시간,  $t_0$ 라 정의한다(Yano, 1985).

## 2.2 준설토의 퇴적 특성

현장에서 채취한 시료를 이용하여 초기 높이와 초기 함수비를 변화시키면서 침강압밀시험을 실시하면 실질 토량고,  $H_s$ 와 초기 계면고,  $H_i$ 간에는 식 (1)과 같은 관계가 성립한다.

$$H_s = \frac{H}{1 + G_s/G_w \cdot \bar{w}} = \frac{H_i}{1 + e} \quad (1)$$

여기서,  $G_s, G_w$ : 토립자의 비중, 물의 비중

$\bar{w}, e$ : 평균 함수비, 평균 간극비

초기 함수비가 증가함에 따라 침강속도는 빨라지지만 동일한 초기 함수비라 하더라도 응집도와 밀도로 인하여 침강속도의 차이가 있다. 또한 초기 시료높이와 초기 함수비가 주어지면 침강 후의 퇴적된 시료 높이는 식 (2)를 이용하여 구한다(Imai, 1980).

$$\frac{H_s}{H_i} = \frac{1 + (G_s/G_w) \bar{w}_0}{1 + (G_s/G_w) w_0} \quad (2)$$

여기서,  $\bar{w}_0, w_0$ : 평균 함수비, 초기 함수비

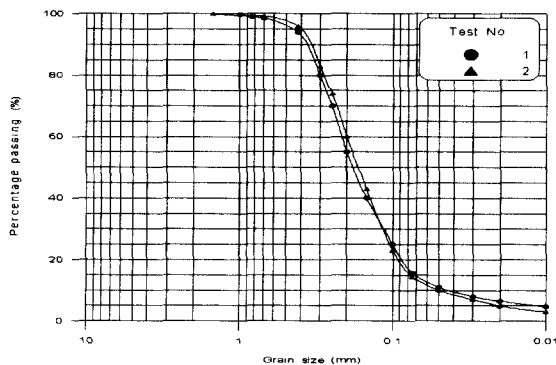


그림 3. Grain Size Distribution Curves

표 1. Geotechnical Engineering Properties of Dredged Soil

Property	Value
Liquid Limit	N.P
Plastic Limit	N.P
Plasticity Index	N.P
Specific Gravity	2.65
Percent Fines(<#200 sieve)	15.1%
USCS	SM

## 3. 실내 시험

### 3.1 시료 특성

본 연구에서 사용한 시료의 물성치는 표 1과 같으며 입도분석 결과는 그림 3과 같다. 시료는 소성지수가 비소성 상태이며 200번체 통과량은 15.1%로 통일분류법상 SM에 해당된다.

### 3.2 시험 장치 및 방법

본 논문에서 사용한 시험 장치는 그림 4와 같다. 시험 장치는 직경 18cm, 높이 150cm로 아크릴로 제작된 원형 실험장치와 하부에서 침강시험전에 교반할 수 있는 압축 펌프 등으로 나눌 수 있다.

침강압밀시험을 실시하기 전 시료의 균질성을 확보하기 위하여 #100번체를 이용하여 각종 유기물질을 제거하였다.

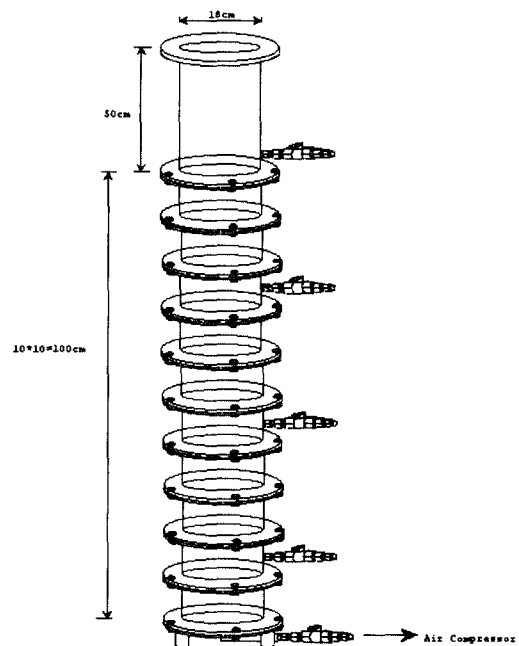


그림 4. Schematic of Testing Apparatus

체가름과 교반으로 준비된 시료에 대하여 함수비를 측정하고, 염분비를 보정하여 시험하고자 하는 함수비로 조정하였다(Imai, 1979).

매 시험시마다 함수비를 측정하여 함수비를 조정하였으며 함수비가 조정된 시료는 다시 교반을 실시하여 원형 토조에 투기하였다. 투기 시료에 대한 함수비 적정성을 판단하기 위하여 함수비를 측정하였다. 시료투기 후 하부밸브와 압축펌프를 연결하고 압축공기를 주입하여 시료를 교반하였으며 입자들이 플록을 형성하지 않고 자유침강 운동을 한다고 판단된 시점에서 공기 주입을 멈추고 계측을 실시하였다.

일반적으로 준설토의 계면고 관찰은 육안에 의하여 실시하므로 본 시험에서도 계면고 및 퇴적고 변화에 대한 관찰을 육안에 의하여 실시하였다. 시험시작 후 30분까지는 1분마다 관찰을 실시하였으며 이후 최종 계면고를 형성하기 전까지 15분마다 관찰을 실시하였다.

### 3.3 시험 조건

본 시험에서는 초기 함수비와 초기 시료높이를 각각 구분하여 총 16회의 시험을 실시하였다. 함수비는 흙의 중량에 대한 해수의 중량으로 표현되므로 염분이 많이 함유된 해성점토를 노건조시켜 얻은 함수비는 염분이 흙 속에 포함되어 있기 때문에 실제 값보다 작은 값을 갖게 되므로 보정이 필요하다.

따라서 염분비,  $\beta$ 는 0.027로 조정하여 함수비를 보정하였다. 또한 투기 시료의 균질성을 확보하기 위하여 매 시험마다 염분비를 보정하여 제조한 시료의 측정 함수비,  $w_e$ 를 측정하였으며, 60, 120, 80, 100cm의 단계별로 1 cycle을

표 2. Testing Condition

$w_i$ (%)	$\beta$	$w_e$ (%)	$H_i$ (cm)	$w_i$ (%)	$\beta$	$w_e$ (%)	$H_i$ (cm)
500	0.027	506	60	1000	0.027	1010	60
			80				80
			100				100
			120				120
700	0.027	709	60	1400	0.027	1407	60
			80				80
			100				100
			120				120

형성하면서 투기하였다.

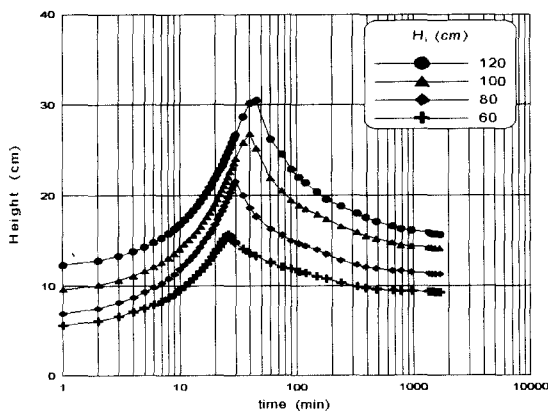
## 4. 실험결과 및 분석

### 4.1 시간에 따른 퇴적고 및 계면고

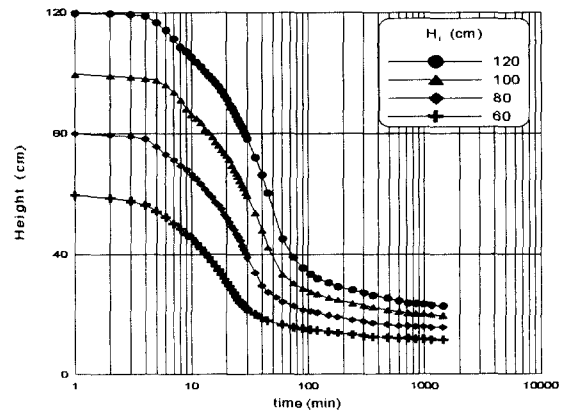
염분비를 보정한 준설토를 시험장치에 투기하여 초기 함수비에 따라 시료높이를 달리하여 시험을 실시한 결과, 초기 함수비 500, 700%를 경계점으로 침강 및 퇴적 현상의 뚜렷한 구분이 발생하였다.

그림 5는 초기 함수비 500%, 700%에 대한 시간에 따른 계면고와 퇴적고를 나타낸 것이다.

초기 함수비가 700% 이상인 고함수비의 경우 실트질 점토의 양이 입자간의 간섭이 이루어질 정도로 충분하지 않아 계면고를 육안으로 관찰할 수 없었으며 하부는 실트질 점토보다 입자가 큰 모래의 퇴적 현상을 뚜렷하게 관찰할 수 있었다. 이에 비하여 초기 함수비 500%에서는 실트질 점토의 입자간에 간섭침강이 충분히 발생하여 계면고를 형성하여 침강하는 현상이 나타났으며 하부의 퇴적고

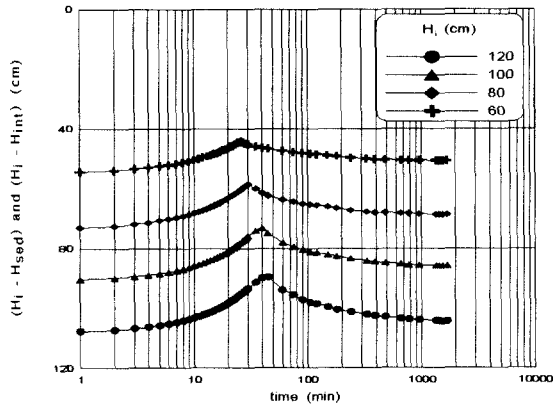


(a)  $\omega_h = 700\%$

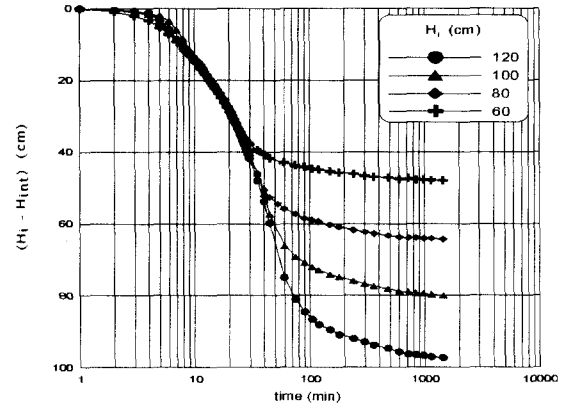


(b)  $\omega_h = 500\%$

그림 5. Change of SFL and interface with time

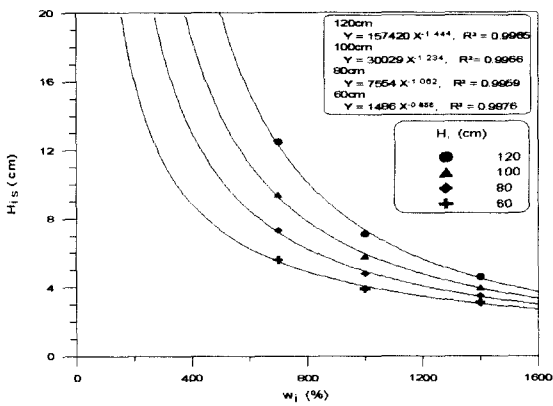


(a)  $\omega_i = 700\%$

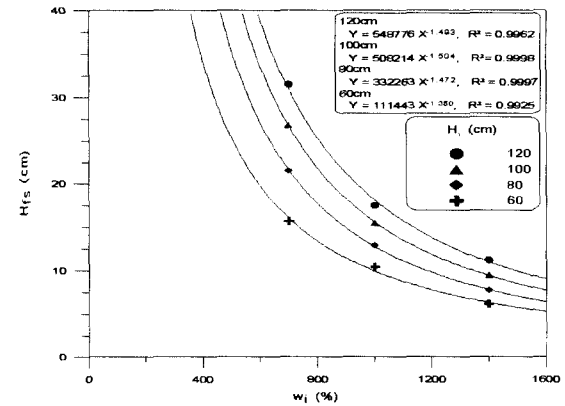


(b)  $\omega_i = 500\%$

그림 6.  $(H_i - H_{sed})$  and  $(H_i - H_{int})$  with time



(a) Initial Sediment Height



(b) Final Sediment Height

그림 7. Variation of  $H_{sed}$  with  $\omega_i$

변화는 실트질 점토의 간섭침강으로 육안으로 뚜렷하게 관찰되지 않았다.

그림 6은 초기 함수비 500%, 700%에 대하여 초기 시료 높이를 기준으로 계면고 변화,  $H_{int}$  및 퇴적고 변화,  $H_{sed}$ 의 차를 시간에 따라 도시한 것이다.

초기 함수비 700%의 시간에 따른 초기 시료높이와 퇴적고 차는 초기 함수비 500%의 초기 시료높이와 계면고 차의 변화와 같이 퇴적 완료 이후에 대하여 초기 시료높이가 클수록 최종 계면고 형성시까지 압축성이 매우 크며 시료높이가 작을수록 압축성이 매우 작은 유사한 거동을 하는 것으로 판단된다. 또한 퇴적 완료에 도달하는 시간은 초기 시료높이가 클수록 지연되며 초기 함수비가 클수록 최종 계면고는 더 크게 침하하는 특성을 나타낸다. 이와 같이 초기 함수비 500, 700%를 경계점으로 계면고와 퇴적고 관찰이 구분되는 함수비가 나타날 것으로 판단되며 이러한 함수비를 전이 함수비(transition water content, TWC)라 정의할 수 있다.

#### 4.2 초기 함수비에 따른 퇴적고

그림 5(a)를 통하여 초기 퇴적고,  $H_{is}$ 는 시험 시작 후 1분이 진행되었을 때의 퇴적고로 정의되며 최종 퇴적고,  $H_{fs}$ 는 퇴적이 완료되어 그 값이 최대 되었을 때의 퇴적고를 최종 퇴적고로 정의할 수 있다.

전이 함수비 이상에 대한 초기 퇴적고와 최종 퇴적고를 초기 시료높이별로 도시하면 그림 7과 같다. 전이 함수비 이상의 함수비에서 초기 및 최종 퇴적고는 높은 상관계수를 갖는 누승 관계를 갖는다.

이러한 관계로부터 전이 함수비 이하의 초기 함수비 500%의 초기 퇴적고 및 최종 퇴적고를 추정할 수 있다. 비록 입자간의 간섭침강으로 퇴적고를 예측할 수 없지만 세립분이 비소성 준설토의 거동을 지배하는 요소가 아니므로 퇴적고 관계를 통하여 충분히 전이 함수비 이하의 퇴적고를 예측할 수 있다.

초기 함수비가 작을수록 초기 퇴적고가 급격히 증가하

표 3. Function with  $w_i$  and  $H_i$

$w_i$	$H_i$	Orthogonal Polynomial Function	$R^2$ (degree 1, 2, 3)
700	60	$Y = 5.235 + 0.449X - 0.0015X^2$	0, 0.9990, 0.9997
	80	$Y = 6.503 + 0.540X - 0.0012X^2$	0, 0.9995, 0.9998
	100	$Y = 8.762 + 0.572X - 0.0025X^2$	0, 0.9944, 0.9978
	120	$Y = 11.317 + 0.599X - 0.0030X^2$	0, 0.9877, 0.9967
1000	60	$Y = 3.244 + 0.368X - 0.0009X^2$	0, 0.9956, 0.9958
	80	$Y = 4.072 + 0.298X + 0.0023X^2$	0, 0.9924, 0.9942
	100	$Y = 4.608 + 0.400X - 0.0005X^2$	0, 0.9974, 0.9975
	120	$Y = 5.641 + 0.431X - 0.0008X^2$	0, 0.9987, 0.9989
1400	60	$Y = 2.676 + 0.258X - 0.0036X^2$	0, 0.9828, 0.9915
	80	$Y = 3.208 + 0.256X - 0.0013X^2$	0, 0.9918, 0.9927
	100	$Y = 3.562 + 0.231X - 0.0002X^2$	0, 0.9866, 0.9867
	120	$Y = 4.337 + 0.188X + 0.0020X^2$	0, 0.9895, 0.9937

며 전이 함수비 이하의 초기 함수비에서 이러한 경향이 더욱 뚜렷하게 나타난다. 이는 초기 함수비가 작을수록 전체 흙 중량(solid weight)이 많고, 세립분의 간섭침강을 많이 받기 때문으로 비선형적인 관계를 갖는 것으로 판단된다.

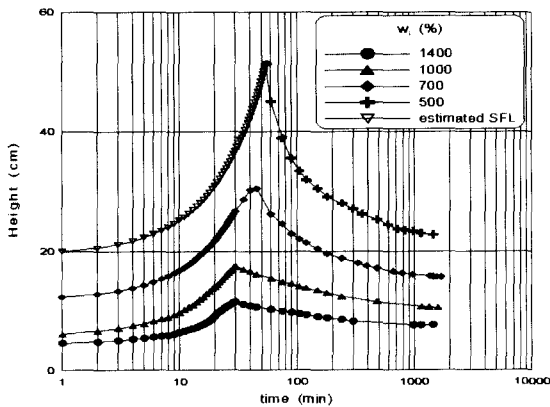
### 4.3 전이 함수비 이하의 퇴적고 예측

그림 8 (a)는 초기 시료높이 120cm의 퇴적고 변화과정을 예측한 것이다. 그림 8 (b)는 초기 시료높이별로 시간에 따른 퇴적고 변화를 계면고 변화와 동시에 도시한 것이며 시료 전체에 대한 퇴적 완료시점과 자중압밀 시중점을 나타낸 것이다. 표 3과 같이 전이 함수비 이상의 모든 시료는 초기높이와 무관하게 orthogonal polynomial 형태의 거동을 보이며, 1000% 이하에서 상관성이 다소 높은 특성을 보인다.

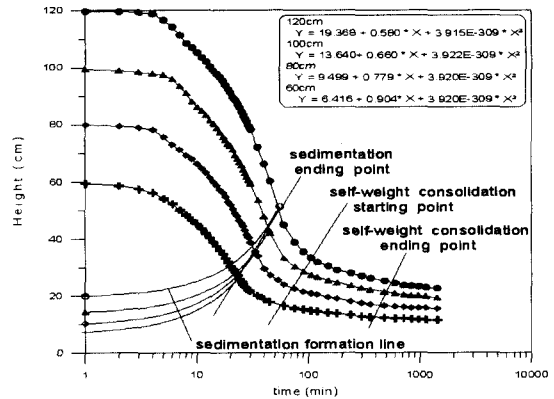
이와 같은 거동 특성으로부터 그림 8 (a)와 같이 초기 시료높이에 따라 초기 함수비 500%에 대한 거동을 예측할 수 있으며 거동 예측 함수는 그림 8 (b)에 나타낸 바와 같다.

상기 과정으로부터 비소성 준설토의 퇴적 특성은 준설 점토와 달리 초기 퇴적고에 해당하는 시간에서 퇴적층이 어느 정도 형성되고, 이후 퇴적층의 두께가 바로 증가하기 보다는 일정한 시간이 경과하면서 퇴적이 점차적으로 진행되며, 퇴적층이 최종적으로 완료하기 전에 초기 함수비 및 초기 시료높이에 의존하여 급격히 증가하는 특성을 갖는다.

또한 시료 전체의 퇴적 완료시점과 고소성 준설점토에 적용되는 자중압밀 시점을 비교하면 퇴적 완료시점과 자중압밀 시점은 일치하지 않는다. 따라서 비소성 준설토의 경우 침강 완료시점을 고소성 준설토에 작용하는 시점으로 적용하기보다는 퇴적 완료시점으로 보는 것이 타당하



(a)  $H_i = 120\text{cm}$



(b)  $w_i = 500\%$

그림 8. Estimation of SFL below TWC

며 퇴적 이후를 압축 과정으로 볼 수 있다.

#### 4.4 비소성 준설토의 침강 및 퇴적 특성

계면고 관찰이 이루어진 초기 함수비 500%에 대한 퇴적고 예측을 통하여 전이 함수비 이하의 준설토뿐만 아니라 비소성 준설토 전체의 침강 및 퇴적 특성을 설명할 수 있다.

그림 9(a)는 시간에 따른 계면고와 퇴적고의 차를 도시한 것이다. 그림 9(a)에서 계면고와 퇴적고 차이는 *orthogonal polynomial* 형태의 거동을 나타낸다. 초기 부분에서 시료 상부의 세립토의 응집도 차이로 인하여 다소 값이 분산되는 경향을 주지만, 전체적으로 높은 상관계수를 갖는 것으로 나타났다.

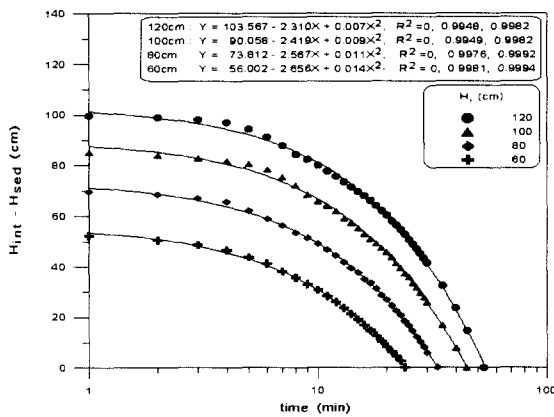
그림 9(b)는 초기 계면고와 초기 퇴적고의 차를 퇴적 완료 시점,  $time_{sed}$ 에 대하여 도시한 것으로 그림 9(a)의 x축, y축의 값을 나타낸다.

초기 계면고와 퇴적고 간의 차이와 퇴적 종료시점에는

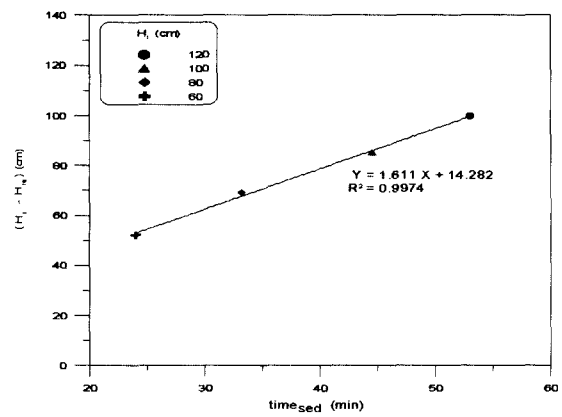
상관성이 매우 큰 선형 관계를 갖는다. 그림 7에서 초기 함수비에 따른 초기 퇴적고를 예측하면 그림 9(b)를 통하여 임의의 초기 시료높이에 대하여 퇴적이 완료되는 시간을 추정할 수 있다.

그림 9(c)는 계면고와 퇴적고의 차를 정규화하여 시간에 따라 도시한 것이다. 정규화한 높이,  $H_n$ 은 계면고와 퇴적고 차를 각각 초기 시료높이로 나누어서 정규화할 수 있다. 정규화한 높이는 초기 시료높이가 낮을수록 초기에 1에 가까운 값을 갖지만, 퇴적 완료시점이 빠르기 때문에 시간 증가에 따라 0의 값에 빠르게 수렴하는 경향을 나타낸다.

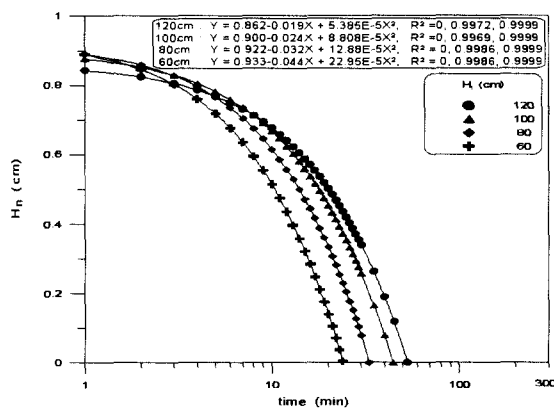
그림 9(d)는 정규화한 높이의 차를 시간에 따라 도시한 것으로 정규화한 높이 차의 증가 구간과 감소 구간이 확연하게 구분된다. 초기 시료높이가 큰 두 시료에 대한 정규화 높이 차는 초기 시료높이가 작은 두 시료에 비하여 증가 구간에서는 증가 폭이 크지 않은 경향을 보이며 감소 구간에서는 기울기가 다소 감소하는 경향을 보인다.



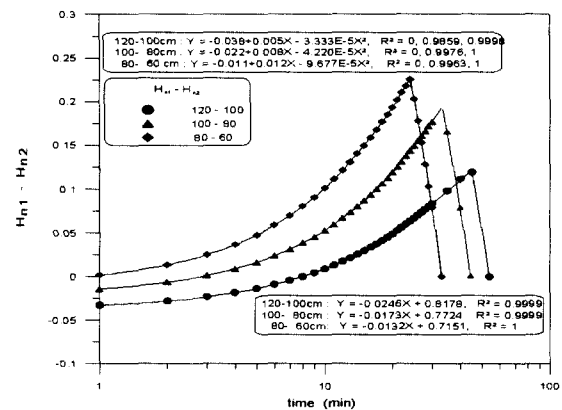
(a)  $(H_{int} - H_{sed})$  with time



(b)  $(H_i - H_{is})$  with  $time_{sed}$



(c)  $H_n$  with time



(d) Difference between  $H_{n1}$  and  $H_{n2}$

그림 9. Characteristic of Non-plastic Dredged Soil

표 4. Function between  $H_{is}$  and  $H_{fs}$

Conditions		Function	$R^2$
$w_i$ (%)	500	$Y = -9.234 + 5.709X - 0.134X^2$	0, 0.9420, 0.9999
	700	$Y = -13.039 + 6.622X - 0.252X^2$	0, 0.9463, 0.9903
	1000	$Y = -19.194 + 10.344X - 0.709X^2$	0, 0.9791, 0.9994
	1400	$Y = -4.145 + 3.103X + 0.066X^2$	0, 0.9976, 0.9977
$H_i$ (cm)	60	$Y = 4.373X - 7.384$	0.9951
	80	$Y = 4.042X - 6.160$	0.9903
	100	$Y = 3.343X - 3.407$	0.9972
	120	$Y = 2.522X + 0.529$	0.9854

표 5. Function between  $H_{fs}$  and  $H_{fi}$

Conditions		Function	$R^2$
$w_i$ (%)	500	$Y = 0.441X + 0.176$	0.9978
	700	$Y = 0.429X + 2.358$	0.9901
	1000	$Y = 0.533X + 1.269$	0.9951
	1400	$Y = 0.552X + 1.408$	0.9998
$H_i$ (cm)	60	$Y = 0.889 + 0.693X - 0.011X^2$	0, 0.9697, 0.9989
	80	$Y = 2.038 + 0.507X - 0.063X^2$	0, 0.9939, 0.9997
	100	$Y = 1.498 + 0.584X - 0.004X^2$	0, 0.9986, 0.9998
	120	$Y = 2.864 + 0.443X - 0.001X^2$	0, 0.9988, 0.9996

4.5 초기 퇴적고와 최종 퇴적고 관계

전이 함수비 이상의 초기 및 최종 퇴적고, 퇴적고 예측을 통하여 얻은 전이 함수비 이하의 퇴적고를 이용하여 표 4와 같이 초기 함수비와 초기 시료높이에 따른 함수식을 얻을 수 있으며 그림 10과 같이 초기 및 최종 퇴적고 간의 관계를 도시할 수 있다.

초기 퇴적고와 최종 퇴적고 간에는 동일한 초기 시료높이에 대하여 선형 관계를 갖는데, 이는 그림 8(a)와 같이 초기 함수비에 따라 퇴적이 완료되는 시점에 큰 차이가 발생

하지 않으며, 두 퇴적고 사이에 유사한 함수식을 갖는 거동을 하기 때문이다. 시험 초기에는 입경이 큰 입자부터 침강하여 퇴적을 하며 비소성 준설토는 이러한 현상이 뚜렷하게 발생한다. 전이 함수비 이하에 대하여 세립분의 간섭침강이 전 시료높이에 균일하게 작용하기 때문에 초기 퇴적고와 최종 퇴적고간에는 선형 거동을 하게 된다.

또한, 동일한 초기 함수비에 대하여 orthogonal polynomial 형태의 비선형 관계를 갖는데, 이는 그림 8(b)와 같이 퇴적 완료 시점이 초기 높이에 따라 큰 차이가 발생하며, 두 퇴적고 사이에 유사하지 않는 함수식을 갖기 때문이다.

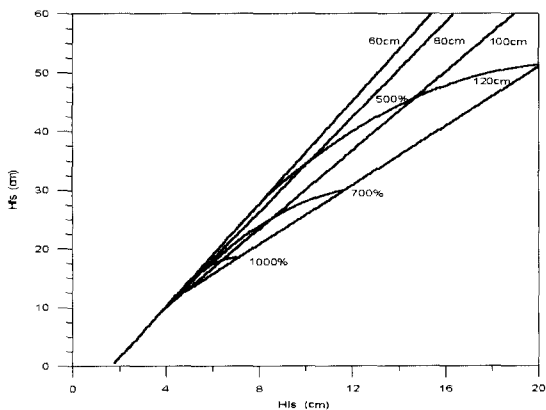


그림 10. Idealized relationship between  $H_{fs}$  and  $H_{fs}$

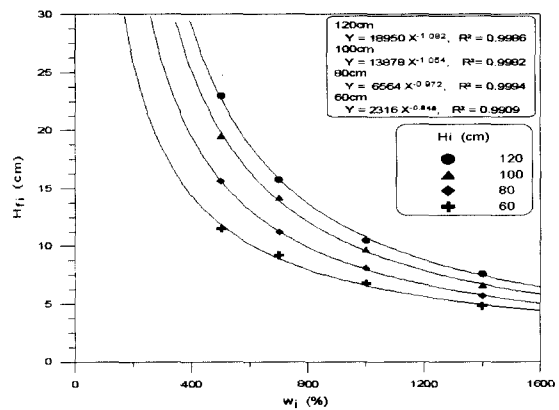


그림 11.  $H_{fi}$  with  $w_i$



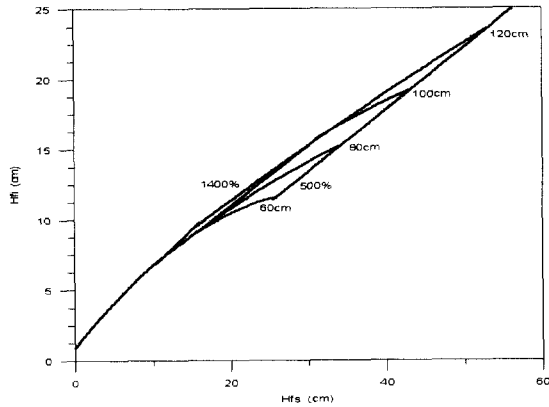


그림 12. Idealized relationship between  $H_{fs}$  and  $H_{fi}$

#### 4.6 최종 퇴적고와 최종 계면고 관계

그림 11은 초기 함수비에 따른 최종 계면고를 도시한 것이다. 최종 계면고,  $H_{fi}$ 는 계면고 변화가 없는 시점의 계면고로 정의되며 약 1440~1560분에서 수렴하는 경향을 나타낸다. 초기 함수비에 따른 최종 계면고는 초기 퇴적고, 최종 퇴적고와 같이 누승 형태의 거동을 보인다.  $R^2$ 의 값이 0.98이상으로 상관관계가 매우 높음을 알 수 있다.

표 5는 측정 및 예측을 통하여 얻은 최종 퇴적고와 최종 계면고 관계를 초기 함수비와 초기 시료높이에 따라 얻은 함수식이다. 이러한 관계로부터 그림 12와 같이 이상화된 관계를 도출할 수 있다.

최종 퇴적고와 최종 계면고 사이에는 동일한 초기 시료높이에 대하여 orthogonal polynomial 형태의 관계를 갖는데, 이는 그림 8(a)와 같이 초기 함수비에 따라 거동 특성이 다르게 나타나기 때문이다. 동일한 초기 시료높이에 대하여 초기 함수비가 작을수록 최종 퇴적고와 최종 계면고의 차이가 크게 발생하는데, 이는 초기 함수비가 작을수록 세립분의 흡수량이 많고, 상부 흡 자중에 의한 영향으로 계면고 변화가 크게 발생하기 때문이다. 또한 두 퇴적고 사이에는 동일한 초기 시료높이에 따라 선형 관계를 나타내는데, 이는 퇴적 종료시점과 최종 계면고 측정시점에서 각 높이가 그림 8(b)와 같이 초기 시료높이에 대하여 일정하게 나타나기 때문이다.

초기 함수비와 초기 시료높이는 최종 퇴적고와 최종 계면고 관계에 영향을 주며 두 관계 사이에는 초기 함수비보다는 초기 시료높이에 다소 큰 영향을 받는다.

그림 13은 최종 퇴적고와 최종 계면고 차이를 초기 시료높이로 정규화하여 초기 함수비에 따라 도시한 것이다. 정규화 높이,  $H_{fi}'$ 은 초기 시료높이와 무관하게 일정한 곡선

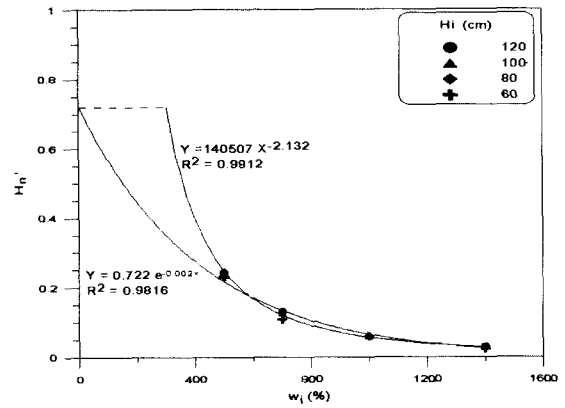


그림 13.  $H_{fi}'$  with  $\omega_i$

으로 수렴하는 경향을 나타낸다. 상관성은 누승 관계가 지수 관계보다 다소 높지만, 이론적으로 초기 함수비가 작더라도 1이 될 수 없으므로 초기 함수비에 따른 정규화 높이는 누승 관계를 갖으면서 일정한 함수비 이하에서 수렴하는 형태를 갖는 것으로 추정된다. 본 연구에서 사용한 시료는 초기 함수비 300%에서 이러한 관계를 갖을 것으로 사료된다.

#### 5. 결론

본 연구에서는 비소성 준설토에 대한 초기 함수비와 초기 시료높이를 달리하여 침강압밀시험을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 비소성 준설토는 세립토의 입자간 충분한 간섭 발생여부에 따라 계면고와 퇴적고가 각각 단독적으로 형성되는 전이 함수비가 존재하며 이는 초기 시료높이보다는 초기 함수비에 큰 영향을 받는다.
- (2) 전이 함수비 이하의 초기 함수비를 갖는 시료는 초기 시료높이가 증가할수록 초기 퇴적고가 급격히 크게 형성되며 이에 비례하여 최종 퇴적고도 크게 형성된다.
- (3) 비소성 준설토의 퇴적은 준설점토와 달리 초기 퇴적고에 해당하는 시간에서 퇴적층이 어느 정도 형성되고, 일정한 시간이 경과하면서 퇴적이 점차적으로 진행되며, 퇴적층이 최종적으로 완료하기 전에 급격히 증가하는 특성을 갖는다.
- (4) 비소성 준설토의 계면고와 퇴적고의 차를 초기 시료높이로 정규화하면 초기 시료높이가 감소할수록 초기에는 1에 수렴하는 반면, 시간 증가에 따라 빠르게 0의 값에 수렴하는 경향을 나타낸다. 또한 시간에 따른 정규

화 높이 차는 증가 구간과 감소 구간이 뚜렷하게 구분되는 특성을 지닌다.

(5) 초기 퇴적고와 최종 퇴적고 관계는 초기 함수비에 큰 영향을 받으며 최종 퇴적고와 최종 계면고 관계는 초기 시료 높이에 더 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. 최종 퇴적고와 최종 계면고 차이를 초기 시료 높이로 정규화하면 초기 시료높이와 무관하게 일정한 곡선으로 수렴하는 관계를 나타낸다.

고소성의 준설점토에 대한 연구는 국내외에서 활발하게 진행되고 있지만 서해안 지역에서 대부분 사용하는 비소성 준설토에 대한 연구는 거의 전무한 실정이다. 향후 본 연구 성과를 바탕으로 비소성 준설매립토의 압축 특성 및 현장 체적비 산정에 관한 연구가 폭넓게 진행되어야 할 것이다.

### 참고 문헌

1. 이 송, 양태선, 황규호(1994), "준설매립 연약지반의 자중압밀 특성", 대한토목학회 논문집, 제 14권 4호, pp. 953-964.
2. 矢野弘一郎(1985), 浚渫粘土による軟弱地盤の性状とその豫測", 土木學會 論文集, 第 364 號, III-4, pp. 1-14.
3. Been, K., & Sills, G. C.(1981), "Self-Weight Consolidation of Soft Soils: An Experiment and Theoretical Study", Geotechnique, Vol. 31, pp. 519-535.
4. Imai, G., Tsuruya, K., Yano, K.(1979), "A Treatment of salinity in water content determination of very soft clays", Soil and Foundation, Vol. 19, No. 3, pp. 84-89.
5. Imai, G.(1980), "Settling behaviour of clay suspension", Soil and Foundation, Vol. 20, No. 2, pp. 61-77.
6. Imai, G.(1981), "Experimental Studies on Sedimentation Mechanism and Sediment Formation of Clay Materials", Soil and Foundation, Vol.21, No. 1, pp. 7-20.
7. Kynch, E. J.(1952), "A Theory of Sedimentation", Transaction of the Faraday Society, Vol. 48, pp. 166-176.
8. Lin, T. W., and Lohnes, R. A.(1981), "Sedimentation and Self Weight Consolidation of Dredged Spoil", Conference Proceeding, ASCE, pp. 464-480.
9. McRoberts, E. C., & Nixon, J. F.(1976), "A Theory of Soil Sedimentation", Canadian Geotechnical Journal, Vol.13, pp. 294-310.
10. Monte, J. L., and Krizek, R. J.(1976), "One Dimensional Mathematical Model for Large Strain Consolidation", Geotechnique, Vol. 26, No. 3, pp. 495-510.
11. US. ARMY(1978), "Dredged Material Research Program - US. ARMY Technical Report".

(접수일자 2001. 1. 12)