

## 조립토가 혼합된 준설토의 퇴적 및 압밀특성

### Sedimentation and Consolidation Characteristics of Dredged Soils Mixed with Sand Materials

이 송\*<sup>1</sup> Lee, Song  
전 종 구\*<sup>2</sup> Jeon, Jong-Koo

#### Abstract

This paper presents sedimentation and consolidation characteristics of dredged soils mixed with sand materials through the self-weight consolidation tests adopting stepwise filling method. After completely throwing away dredged soils daily by four kinds of S-C, which is the quantity of sand contained, results from laboratory tests are compared with those from a new method using hyperbolic, which considers stage settling and consolidating characteristics, and those from the existing analyzing method. Liquid limit up to 65% had a large effect on consistency properties. Assuming that the settlement occurred only by clay content of dredged soils, it is shown that the clay void ratio is less than 2 and 4 respectively in case S-C is 0% and 50%. In the applied hyperbolic method, reinitialized curve has a linear behavior of a coefficient of correlation of almost 1, and the coefficient of slope and intercept except for the specimen with the height of 10cm and 20cm had a tendency to follow exponent function and a shape of zone settling and dispersing settling. The results computed by the applied hyperbolic method rather than the existing analyzing method coincide with those of laboratory tests. It is shown that the former is more suitable than the latter for the area considering the influence of sand materials.

#### 요 지

본 연구에서는 준설토 전체건조시료중의 모래함유율을 모래혼합비율, S-C라고 정의하고 단계별 투기방법에 의한 실내침강압밀시험을 통하여 S-C별 침강 및 압밀, 퇴적현상을 제시하였다. 또한 혼합토에서 서로 다른 거동을 보이는 점토분과 조립분을 분리시켜 S-C에 따른 점토분만의 간극비와 침하량을 계산하였다. 투기완료 후 S-C별 실내시험결과를 기존의 경험적인 해석방법과 쌍곡선법을 응용한 새로운 방법으로 산정한 투기완료 후의 계면고, 체적비 변화와 비교, 분석하였다. 시험결과 자중압밀완료 후 S-C가 증가할수록 액성한계가 혼합토의 컨시스턴시에 대한 영향을 많이 끼치며, 그 한계는 대략 65%로 판단된다. S-C에 따라 점토성분만의 간극비를 계산한 결과, 점토간극비는 S-C가 0%와 50%의 경우 투기완료 후 시간이 아무리 경과되더라도 각각 2와 4이하가 될 수 없음을 보였다. 침하와 시간의 관계에서 재초기화 곡선의 시작점은 矢野弘一郎(1985)가 제시한 침강곡선의 변곡점에 해당하였고 직선과 상관계수가 거의 1인 재초기화 곡선의 거동을 보였다. 재초기화 곡선의 기울기와 절편은 30cm이후 전체높이별 지수함수의 형태로 파악하는게 타당하다고 판단되며, 시료높이별로 계면고변화를 고려하고 투기완료 후 기울기가 시험결과와 잘 일치하는 쌍곡선법을 응용한 예측방법이 기존의 경험적인 방법보다 모래의 영향을 고려한 지역에서 준설 매립 할 경우 더 합리적이라고 판단된다.

**Keywords :** Hyperbolic method, Reinitialized curve, Sand-content, Self-weight consolidation, Stepwise filling method

\*1 정회원, 서울시립대학교 토목공학과 교수 (Member, Professor, Dept. of Civil Engrg., Univ. of Seoul, scugeo@sidae.uos.ac.kr)

\*2 정회원, 서울시립대학교 토목공학과 대학원 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Univ. of Seoul)

## 1. 서론

최근에 바다가 지닌 자연적 친화력을 이용한 다양한 해양 레크레이션 산업과 관광적 목적의 해안공간의 활용을 위한 준설패립사업이 활발히 진행되고 있다.

국내 서해안 지역의 해저바다에 분포하는 원지반을 살펴보면 실트질 모래 또는 모래질 실트가 다른 남해안과 동해안에 비해서 많이 분포하여 있고, 다른 연안에 비해 입자 또한 크다. 모래를 혼합한 이러한 지반에서 토출구로부터 거리별 입도분포의 영향을 고려하지 않으면 침하량 산정시 과대 혹은 과소평가를 하게 되어 막대한 비용이 추가 될 것이고 또한 부등침하로 인한 구조물에 커다란 피해를 줄 수 있다. 이러한 특성을 지닌 준설토는 토출구의 거리에 따라 다양한 입도분포곡선을 가지며 침강과 압밀의 과정도 준설토와 다른 거동 특성을 갖음에도 불구하고, 이에 대한 침강 및 퇴적, 자중압밀 특성에 대한 연구는 거의 이루어지지 않고 있는 실정이다.

본 연구에서는 현장여건을 고려하고 투기 후 입도분리현상을 방지하기 위하여 단계별투기에 의한 투기방법과 토출구로부터 거리별 입도분포를 고려하기 위하여 준설토의 전체건조시료중 모래함유율을 모래혼합비율, S-C로 정의하고 S-C를 달리하여 실내 침강 및 자중압밀시험을 실시하였고 압밀완료 후 준설토의 퇴적특성과 그 변화양상을 관찰하였다. 초기함수비가 일정한 해성토의 침강 및 압밀특성을 규명하기 위하여 모래혼합비율에 따라 투기완료 후 실내시험과 현장 예측치를 정규화시켜 기존의 경험적인 해석방법과 쌍곡선법을 응용한 새로운 방법에 의하여 투기완료 후의 계면고, 함수비, 간극비, 그리고 체적비 변화를 구하여 비교, 분석하고자 한다.

## 2. 준설토에 대한 연구

### 2.1 침강 및 자중압밀에 관한 연구

*Kynch*(1952)는 자유침강이론을 수정한 간섭침강이론을 도입하고 현탁액 침강과정을 고체와 액체상태의 연속방정식을 적용하여 해석하였으며, 퇴적형성선이 시간에 따라 선형을 이루는 간섭침강의 형태를 제안하였고, *Imai*(1981)는 침강형태에 영향을 주는 요인은 토립자의 크기, 초기시료높이, 광물성분, 초기함수비, 배수조건,

염분비, PH 등이며 침강형태를 분산침강, 응집침강, 구간침강, 압밀침강으로 구분하였고, 퇴적형성선은 시간에 따라 곡선을 이룬다고 규명하였다.

압밀변형이 큰 초연약점토에서는 간극비나 응력상태에 따라 비선형의 투수계수나 압밀계수를 가지는 준설토 거동을 관찰하는 연구는 주로 *Gibson*(1967), *Been & Sills*(1981), *Mikasa*(1984) 등에 의해서 유한변형 압밀이론을 제시하였다. *Gibson*등(1967)은 비선형적인 간극비와 유효응력의 관계를 지수관계로 가정하여 일정한 값의 관계정수로 산정한 자중압밀을 고려한 압밀해석 이론을 제시하였고, *Been & Sills*(1981)은 가상 상재하중층을 고려하여 *Lee & Sills*(1981)의 이론해를 수정하여 흙과 가상상재층을 고려한 과잉간극수압분포를 파악하였으나 저응력상태의 구성관계를 선형으로 설정하여 해석하였기 때문에 비선형 구성 관계를 갖는 자중압밀 단계에 대한 신뢰성을 확보하지 못하였다.

상기의 모든 방법은 순수한 준설토만을 대상으로 전체투기방법에 의하여 실시된 연구들이며 단계투기방법과 혼합물에 대한 영향은 고려되지 못했으나, *Tan*(1991)은 점토슬러리위에 포설한 점토와 모래의 혼합물에 대한 압밀침하를 쌍곡선법을 이용하여 추정하면서 미소변형과 유한변형에 모두 유효하다는 것을 보였다.

### 2.2 준설토적토에 관한 연구

준설토적토에 대한 연구는 초기 1960, 70년대에는 퇴적, 전시스턴시 특성을 주로 연구하면서 80년대 중반이후로 고함수비에서 제조한 혼합토에 대한 압밀, 강도시험 등으로 발전되어 왔다.

*Seed*(1964)는 점토의 범위를 0.002mm 보다 가는 입경의 토립자라고 보고, 액성한계는 흙에서 점토분의 함유량에 비례적이며 유기질과 비유기질의 액성한계를 측정할 때 비유기질의 경우는 대략 10%이상에서 유기질의 경우는 약 20%이상에서 액성한계와 점토함유율의 관계가 선형관계를 가진다고 하였고 *Tan* 등(1990)은 모래와 점토의 혼합물의 액성한계는 슬러리가 모래의 간극을 채우려는 걸보기 간극비가 5이하에서 대략적으로 선형의 관계를 갖는다고 하였다.

모래와 점토를 혼합한 흙에 대한 연구는 일반적으로 점토분과 조립분이 혼합토에 각각 다른 역학적 거동에 영향을 미치므로 각각의 영역을 특정화시켜 압밀과 강도특성을 파악하였다.

Fukue 등(1986)은 모래를 혼합한 혼합토의 압밀특성을 파악하여 비점토질의 간극비와 건조밀도, 비중을 산정한 후 준설재로 적절하게 이용될 수 있는 혼합물을 판단할 수 있게 하였고, Kumar 등(1999)은 fall cone 관입치와 압축성의 관계를 측정하면서 점토함유량이 약 35%이상인 시료에서 혼합물의 역학적 거동을 지배하는 것은 단지 점토분에 의한 것이며 조립질의 체적함유율이 0.45에 다다를 때 조립분은 역학적 거동에 영향을 준다고 제안하였다.

### 2.3 투기방법에 따른 체적비 산정 방법

전체투기방법에 의한 침하량 및 체적비 산정은 矢野 弘一郎(1985)가 제안한 자중압밀 시·종점사이에서 침강압밀계수,  $C_s$ 를 구하는 식 (1)과 실질토량고와 초기계면고 사이의 관계 식 (2)를 이용한 경험적인 방법을 국내에서는 많이 이용하고 있다.

$$C_s = \frac{\log(H_{t_0}/H_t)}{\log(t_f/t_0)} \quad (1)$$

여기서,  $t_0$ ,  $t_f$ : 자중압밀시점과 종점 시간  
 $H_0$ ,  $H_f$ :  $t_0$ 와  $t_f$ 에서 계면고

$$H_s = \frac{H}{1 + G_s/G_w \cdot w} = \frac{H}{1+e} \quad (2)$$

여기서,  $G_s$ ,  $G_w$ : 토립자와 물의 비중  
 $\bar{w}$ ,  $\bar{e}$ : 준설토의 평균 함수비와 간극비  
 $H$ : 초기 계면고

단계별 투기에 의한 체적비 산정은 이송(2000)에 의

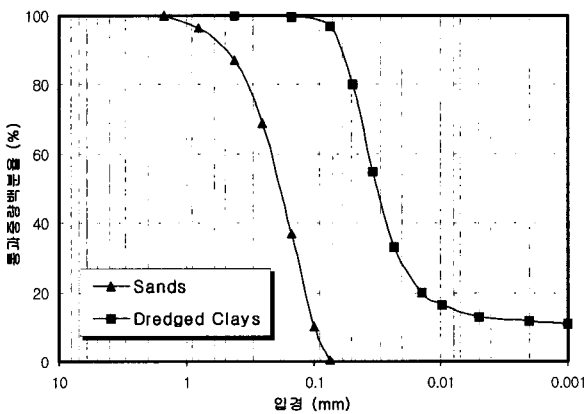


그림 1. 시험시료의 입도분포곡선

하여 경험적인 방법으로 제안되었다. 먼저 시간경과에 따른 계면고변화의 침강 및 압밀곡선에서 투기 속도에 따른 퇴적고 상승속도를 대수눈금으로 나타내고, 대수 눈금의 시간에 대한 대수눈금의 계면고로부터 투기 속도에 따른 침강압밀계수를 얻고 계획하는 계면고와 투기 속도에 맞는 침강압밀계수로부터 소요투기일수와 전체투기높이를 구하고, 산정된 전체투기높이를 바탕으로 계면고와 실질토량고의 관계식을 통해 전체투기높이에 대한 실질토량고를 구할 수 있으며 결국 투기완료 후 시간경과에 따른 침하량 및 체적비는 자중압밀 산정식을 통하여 예측할 수 있다.

### 3. 실내시험

#### 3.1 시료특성

현장에서 채취한 준설점토와 사용된 모래시료에 대한 입도분포와 물성실험결과를 그림 1과 표 1에 각각 나타내었다.

#### 3.2 시험방법

시험시료는 주문진 표준사, 그리고 가는 모래를 이용하여 균일한 평균 모래입경을 가진 모래시료를 제조한 후 통일분류법상 CL 계열의 준설점토와 혼합하여 함수비 500%에 맞는 시료를 염분을 고려하여 제조하였으며 시험장치는 직경 20cm, 시료높이별로 높이 50, 150, 250cm 크기의 아크릴 Column으로 하단에서 10cm 단위로 분리할 수 있도록 하였다. 모래와 실트를 포함한 점토의 구분을 AASHTO와 통일분류법에서 규정한 0.074mm로 구분지어서 시험에 사용된 모래는 #200체를 이용하여 잔류한 시료만을 이용하였다. 준설토 전체건조시료 중의 모래함유율을 모래혼합비율, S-C라 정의하여 S-C를 각각 0%, 10%, 30%, 50%로 맞추어 단계별 투기방법

표 1. 시험시료의 물리적 성질

물성	준설점토	모래
비중	2.70	2.65
200체 통과율	97.7%	0.25%
LL/PI	37.5/19.1	-
Cu/Cg	-	2.1/0.81
통일분류	CL	SP

표 2. 시험조건

염분비	함수비(%)	모래혼합비율, S-C(%)	투기방법	투기속도	시료높이 (cm)	비고
0.025	500	0	단계별 투기	10 cm/day	10	S-C별 각 7회 시행
		10				
		30				
		40				
		70				
		100				
250						

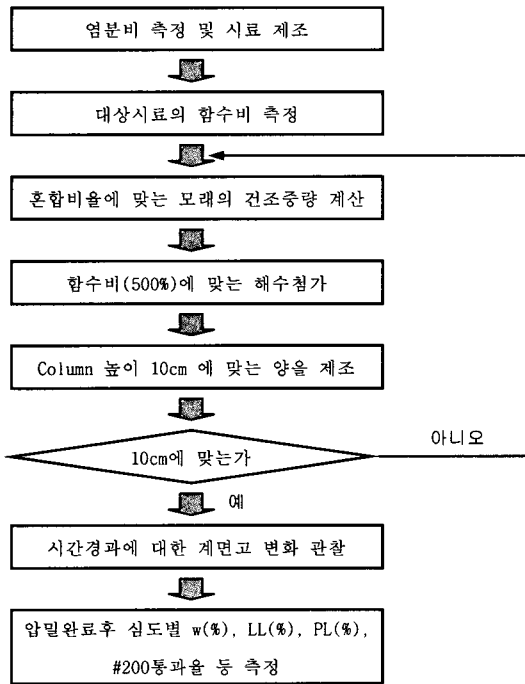


그림 2. 시험절차

에 의한 침강 및 자중압밀시험을 실시하였다.

그림 2와 표 2에는 각각 실내시험 결과와 조건별 시험내용을 보여준다. 투기높이는 각각 10, 20, 30, 40, 70, 100, 250cm로 7가지 경우로 설정하였고, 투기속도는 1일 10cm로 하였으며, 염분비는 0.020 ~ 0.030의 범위를 갖는 서해안 지역의 일반적인 평균치, 0.025로 고려하였으며, 함수비는 염분이 포함된 혼합된 시료를 500%로 만든 후 매일 높이 10cm에 맞는 정확한 양을 제조하여 투기하였으며 투기 후 1일 계면고를 측정하여 퇴적고상승을 관찰하였다.

시험의 정확한 결과치를 얻기 위하여 각 단계별 일정한 투기속도로 투기해야하므로 column 높이 10cm에 준 설물량이 맞는지의 여부가 중요하다.

단계적으로 투기할 때 기존의 경험적인 방법에 의하여 자중압밀 해석시 명확히 구분하지 못하는 각 단계별 침강압밀계수의 영향을 파악하기 위하여 각 단계별 계면고변화를 일정한 시간간격에 따라 지속적으로 파악

했으며, 전체투기높이를 완료한 후에는 24시간 간격으로 계면고를 측정하였다.

투기 완료 후의 계면고 변화를 관찰하면서 일정한 높이로 수렴하는 크리프상태에 도달하였을 때 시험을 종료하고 심도별 함수비, 단위중량, 액·소성한계, #200체 통과율을 측정하였다.

#### 4. 시험결과 및 분석

##### 4.1 심도별 입도분포 및 컨시스턴시 특성

시료높이 100cm에 대하여 자중압밀이 종료됐다고 판단되는 시점에 전체시료높이에 대하여 시료 채취위치를 정규화 높이,  $\eta$ 라고 정의하고  $\eta$ 에 따라 함수비분포, 모래함유율을 측정한 결과를 그림 3에 도시하였다. S-C가 증가할수록 심도별로 지그재그형태를 보이면서 함수비는 감소하고 모래함유율은 증가하는 경향을 보이는데 그 이유는 단계투기에 의하여 지층구조가 샌드위치형태로 형성되었기 때문이다.

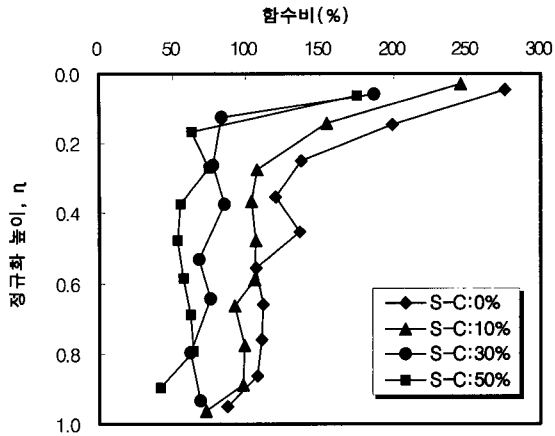
그림 4는 액성한계와 소성지수를 심도별로 평균하여 S-C에 따라서 도시한 결과이다. S-C가 증가할수록 평균 액성한계와 소성지수는 선형적으로 감소한다. 특히 평균 액성한계의 변화폭이 평균 소성지수보다 큰 것으로 보아 액성한계가 준설 후 퇴적토의 컨시스턴시에 영향을 많이 끼치는 것으로 보인다.

그림 5는 심도별로 채취한 시료의 #200체 통과량에서 S-C별로 액성한계를 측정된 결과를 보여준다. 본 시험의 결과 액성한계에 대한 S-C가 65%이하일 때 혼합토의 컨시스턴시에 영향을 줄 수 있으리라 판단된다.

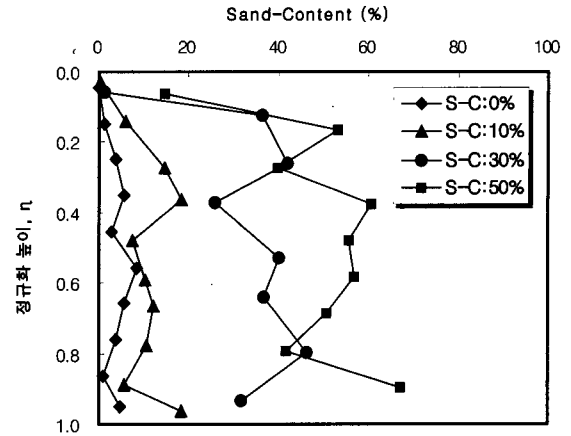
##### 4.2 S-C별 압밀특성

###### 4.2.1 S-C별 시간에 대한 계면고 변화

동일한 함수비로 시료를 매일 column 높이 10cm에 맞는 정확한 양을 제조하여 투기할 때 투기고 상부에



(a) 심도별 함수비 분포



(b) 심도별 모래혼합율

그림 3. 심도별 정규화 높이,  $\eta$ 에 대한 함수비와 S-C분포

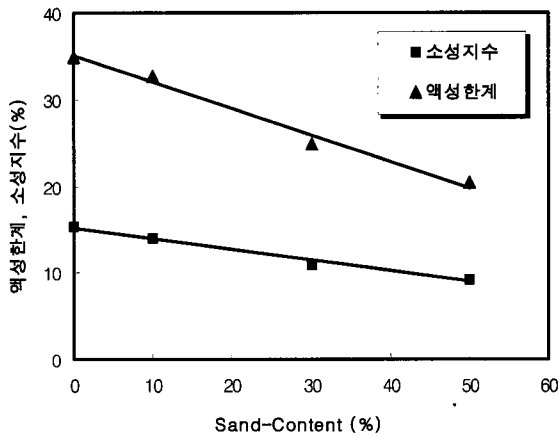


그림 4. S-C에 따른 평균 액성한계와 소성지수 분포

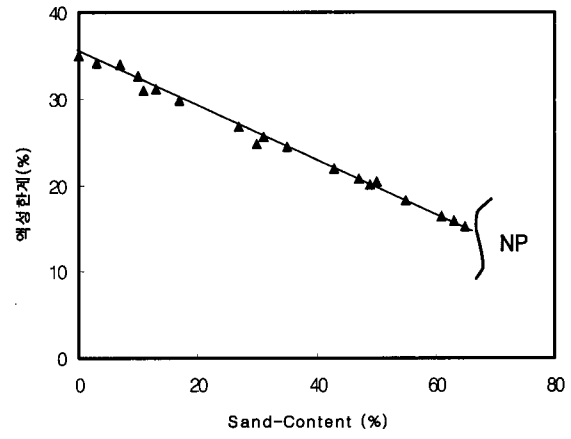


그림 5. S-C에 따른 액성한계 분포

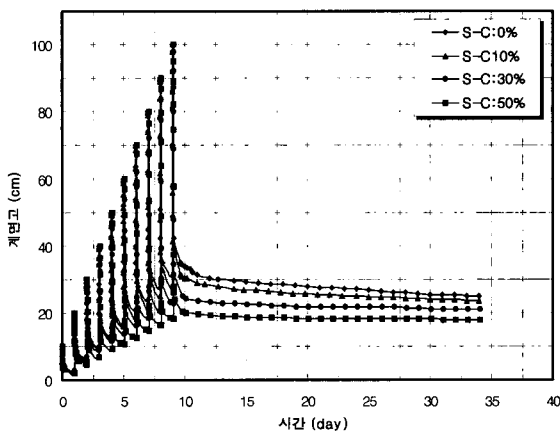


그림 6. S-C별 시간경과에 대한 계면고변화

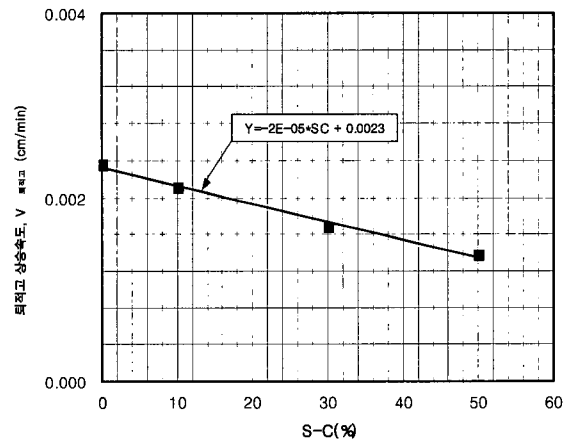


그림 7. S-C별 투기 후 1일 퇴적고 상승속도

투기용 막대 붕을 고정시키고 붕의 상부에 시료를 투기 함으로서 전 단계까지 자중압밀 된 시료의 교란이 최소화 되도록 하였다. 그림 6은 시료높이 100cm의 경우 시

간경과에 대한 계면고 변화를 S-C에 따라서 도시한 결과이다. S-C에 따라서 단계별 투기완료 후 1일 시점에서 퇴적고 상승변화, 즉 투기 후 1일 퇴적고 상승속도

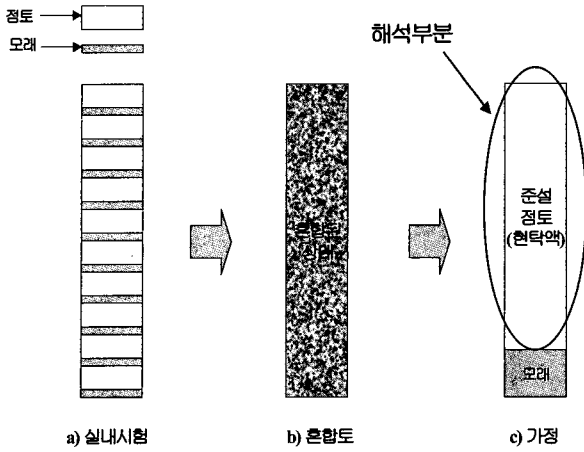


그림 8. 모래와 점토의 층상조직 모형도

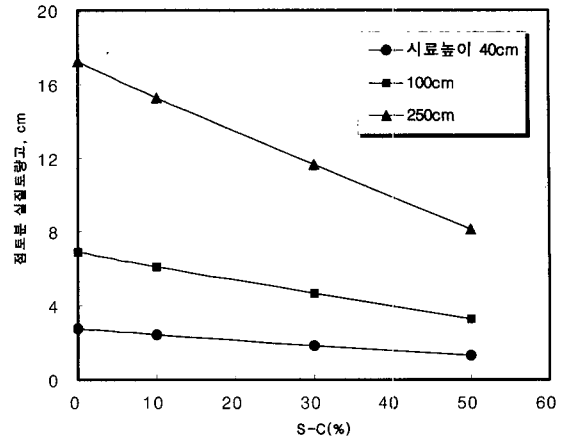
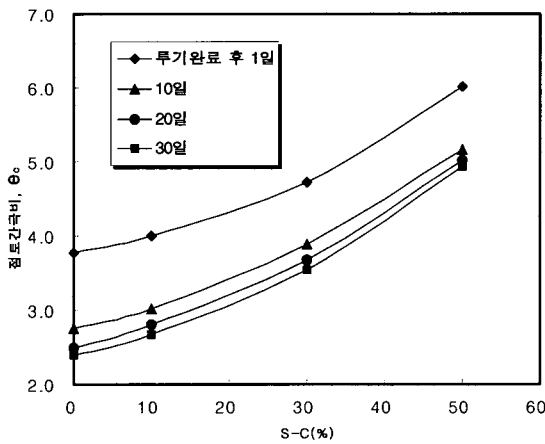
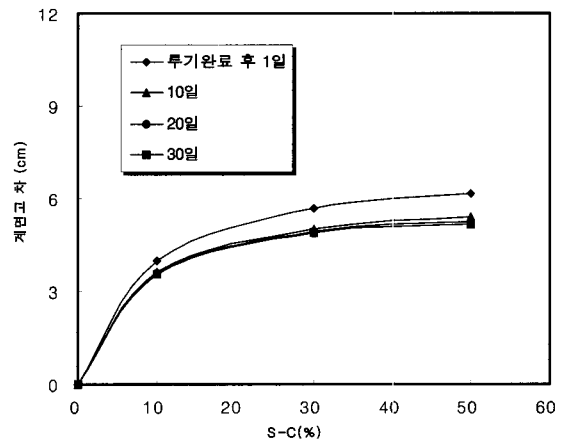


그림 9. S-C별 점토분만의 실질토량고



(a) 점토간극비,  $e_c$



(b) 층상조직에 의한 계면고 차

그림 10. 시료높이 40cm

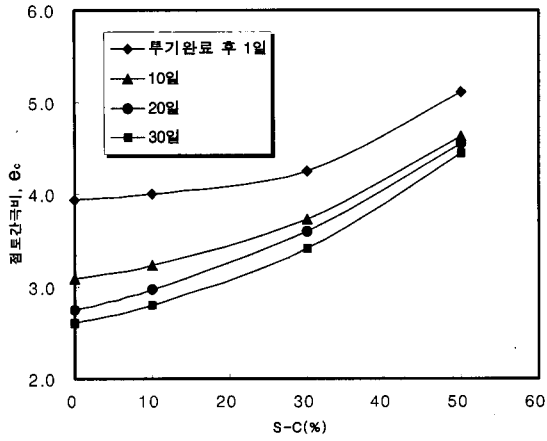
와 투기 완료 후의 계면고 변화에 뚜렷한 차이를 보이고 있다. 그림 7은 투기 후 1일 퇴적고 상승속도를 S-C에 따라 도시한 결과이며 S-C가 증가할수록 투기 후 1일 퇴적고 상승속도는 선형으로 감소함을 보였다.

#### 4.2.2 점토간극비

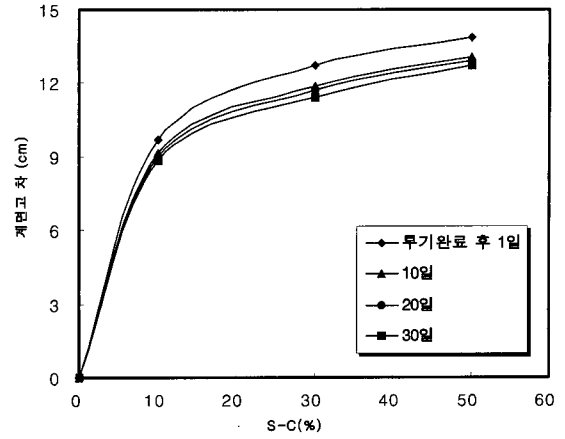
그림 8은 실내시험을 통하여 심도별 층상조직을 점토만의 성분으로 침하를 고려하기 위하여 가정한 모형도이다. 혼합토에서 점토분과 조립분은 서로 다른 거동을 하기 때문에 각각에 대하여 분리시켜 특정화시킬 필요가 있다. S-C에 따라 투기를 종료한 후 실내시험의 모래와 점토의 층상조직을 모형도로 나타내면 그림 8a와 같다. 이러한 층상구조를 그림 8b와 같이 하나의 혼합된 상태로 가정한 후에 다시 S-C에 대한 모래성분을 제외하고 점토만으로 침하가 발생한다면 그림 8c와 같이 나타낼 수 있다.

그림 9에는 먼저 투기속도에 맞는 정확한 건조모래중량, 건조점토중량, 해수중량으로부터 점토만의 함수비와 시료높이를 구하고 실내시험을 통하여 검증한 후 식 (2)에 의하여 S-C에 따라 모래를 제외한 점토분만의 실질토량고를 산정한 결과를 보여준다.

그림 10, 11, 12는 앞서 구한 점토만의 실질토량고와 시료높이별로 점토만의 간극비와 모래와 점토의 층상조직에 의한 침하량을 S-C에 따라 도시한 결과이다. S-C가 증가할수록 실질토량고와 시료높이가 감소하지만 계면고변화가 훨씬 크기 때문에 점토간극비는 투기완료 후 일정한 시간에서 S-C가 증가하면서 선형이 아닌 지수의 형태를 가지며 급격히 증가하였다. 본 실험결과 S-C가 0%와 50%일 경우 투기완료 후 아무리 시간이 경과되더라도 각각 2와 4이하가 될 수 없음을 알 수 있다.

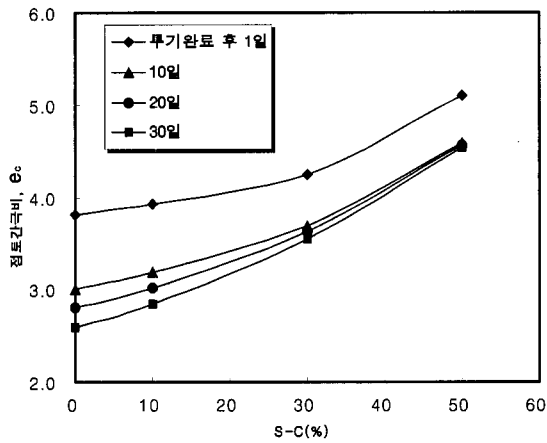


(a) 점토간극비,  $e_c$

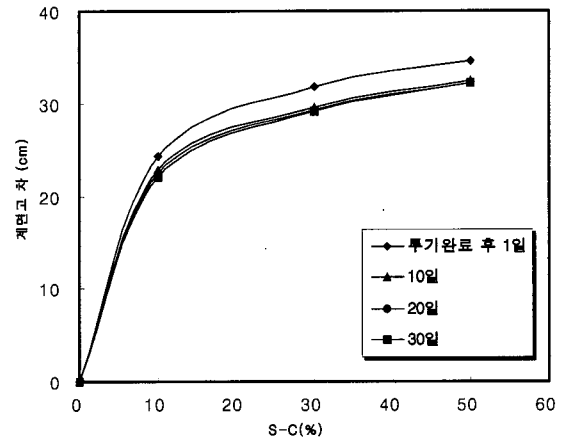


(b) 층상조직에 의한 계면고 차

그림 11. 시료높이 100cm



(a) 점토간극비,  $e_c$



(b) 층상조직에 의한 계면고 차

그림 12. 시료높이 250cm

#### 4.2.3 침강압밀계수

그림 13에는 기존의 경험적인 방법과 쌍곡선법을 이용한 예측방법에 중요한 인자로 쓰이는 자중압밀시·종점 속도와 투기 후 1일 퇴적고 상승속도를 S-C별로 나타낸 결과이다. S-C에 따라서 선형의 감소를 보임으로써 토출구로부터 거리별 입도분포를 고려한 계면고 예측시 더욱 간편하게 산정할 수 있으리라 판단된다.

전체시료높이 100cm일 경우 矢野弘一郎(1985)가 제안한 방법으로 각 단계별로 산정한 침강압밀계수를 그림 14에 보여준다. 각 단계별로 침강압밀계수를 산정한 결과 투기 후 모래함유에 따른 입자농도의 차이 때문에 S-C에 따라 일정한 차이를 보이며 자연대수 함수로 증가함을 보여준다.

특히 처음의 2단계까지는 S-C에 따라서 유사하게 증가하다가 3단계 이후에 현저한 차이로 증가하기 시작하

며 10단계에 가까워질수록 그 차이는 더욱 큰 양상을 가진다. 이것은 초기 투기 시 상등액의 영향이 적은 2단계까지는 압밀침강형태에서 3단계 이후부터 압축성이 큰 구간침강에서 분산침강의 형태를 띠게 되면서 나타나는 현상으로 파악된다. 자중압밀 시점과 종점은 단계별 투기 후 24시간이내에서 발생하였다. 따라서 각 단계별 침강압밀계수의 산정은 다음 단계투기 전에 이루어졌으므로 시료높이에 대한 값으로도 산정할 수 있다.

기존의 경험적인 방법에서 산정한 침강압밀계수는 마지막 단계를 투기하기 전에 이미 하부에서는 이차압밀이 발생하므로 자중압밀 시점을 투기 후 1일 최대 퇴적으로 보아 산정하였다. 이와 같이 대략적으로 자중압밀시점을 구하여 얻은 침강압밀계수에 의한 계면고 변화는 자중압밀시점의 차로 인하여 그 다양한 변화폭을 가지는 문제점을 지니고 있다.

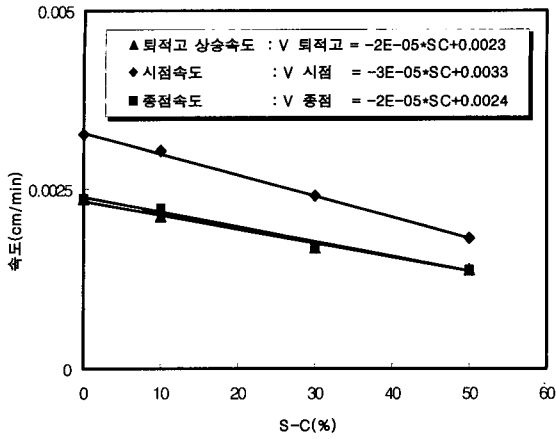


그림 13. S-C에 대한 속도

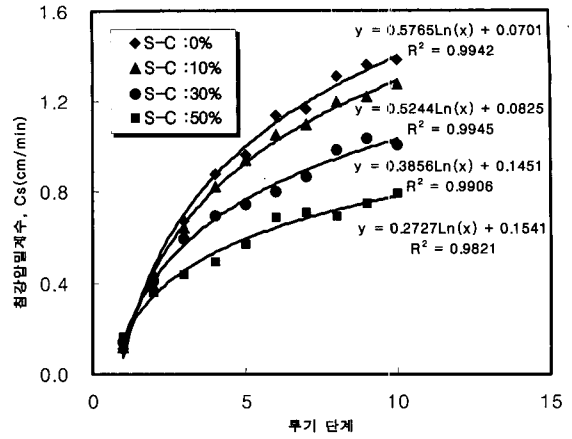


그림 14. 각 단계별 침강압밀계수

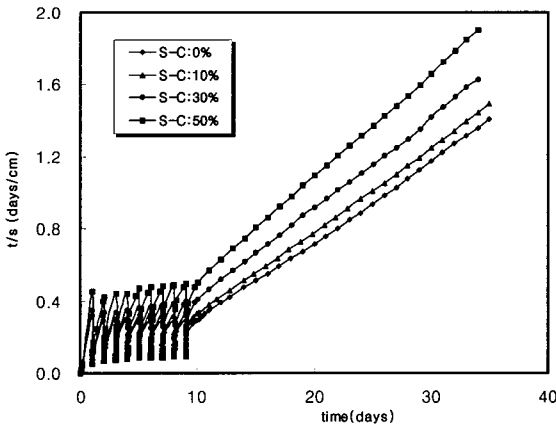


그림 15. S-C별 시간경과에 대한 t/s 관계

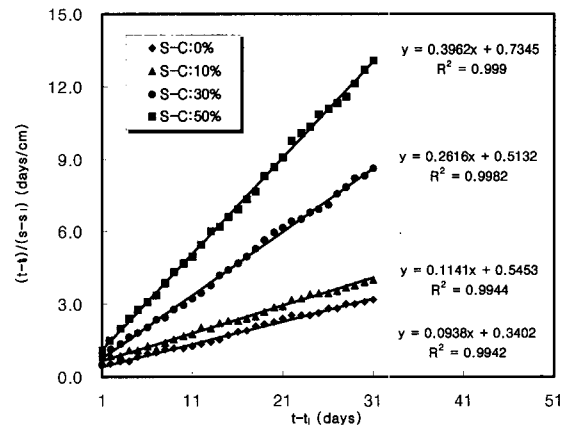


그림 16. 재초기화 곡선

### 4.3 쌍곡선법을 이용한 예측 결과

#### 4.3.1 해석절차 및 적용 예

쌍곡선법에 의한 해석절차는 다음과 같다. 시간경과에 대한 계면고 변화에서 투기 후 1일 퇴적고 상승속도를 파악한 후 소요투기일수를 산정한다. 그리고 나서 각 전체시료높이별 경과시간에 대한 침하속도의 역수,  $t/s$  vs  $t/s$ 와의 관계에서 재초기화시킨 직선의 기울기와 절편을 구한다. 앞서 구한 소요투기일수에 맞는 재초기화된 직선의 기울기와 절편을 단계별 추세선의 수식에서 구한 후 재초기화 직선을 산정하여 시간경과에 대한 계면고 변화와 체적비 변화를 구할 수 있다.

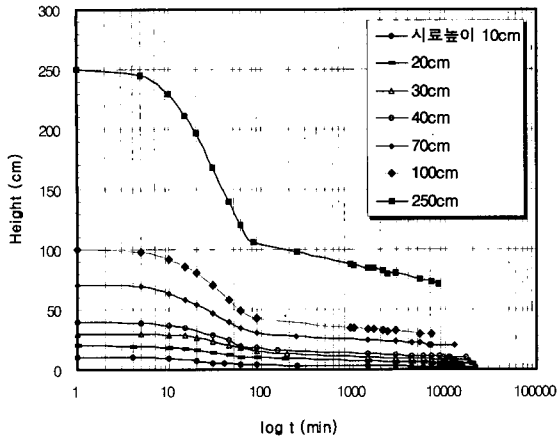
시료높이 100cm의 경우를 예를 들어보면, 일반적으로 그림 6의 시간경과에 대한 계면고변화를 압밀침하와 시간의 관계로 나타내면 그림 15와 같은 쌍곡선의  $t/s$  vs  $t$ 와의 관계를 가진 직선에 접근하는 결과를 보여준다. 그림 15에서 보는 바와 같이 침강과 압밀의 과정을

반복하고, 투기완료 후 10단계이후부터는 퇴적고 상승이 끝나고 자중에 의한 압밀이 시작하면서 쌍곡선적인 직선에 근접하는 경향을 보여주고 있다. 그림 16은 그림 15를 쌍곡선법에 의한 S-C별 시간경과에 대한  $t/s$ 관계를 침강의 단계를 제외한 자중압밀 단계를 해석하기 위하여 재초기화하여 나타낸 결과이다. S-C별 투기완료 후 시간경과에 따라 뚜렷한 선형의 재초기화 직선을 보이고 있으며 그 차이도 뚜렷하다. 따라서 직선의 재초기화 직선의 관계에서 단계별 회귀분석을 통하여 해석하고자 하는 단계의 재초기화 직선을 산정할 수 있다.

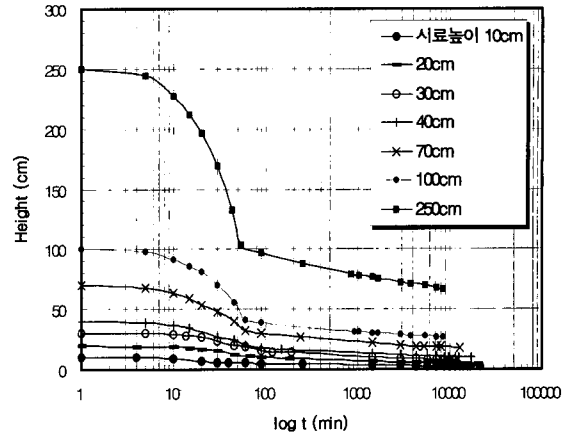
#### 4.3.2 전체시료높이별 시간경과에 대한 계면고 변화곡선

그림 17은 최종 단계투기 후 시간경과에 대한 계면고 변화를 전체시료높이별로 나타낸 결과이다. 시료높이 10, 20cm의 경우를 제외하고는 S-C별로 침강단계와 압밀단계가 확연히 구별되는 구간침강이나 분산침강의 형태를 보이고 있다. 이것은 전체시료높이가 작은 시료

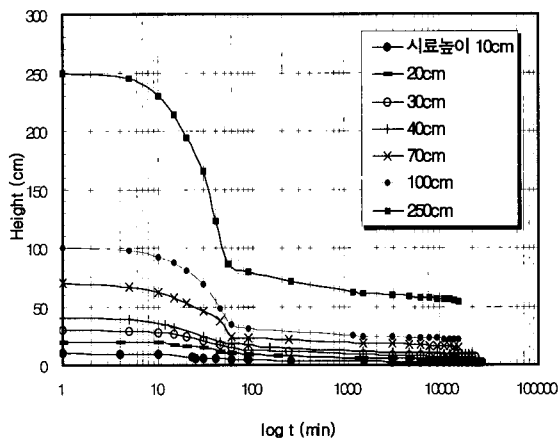




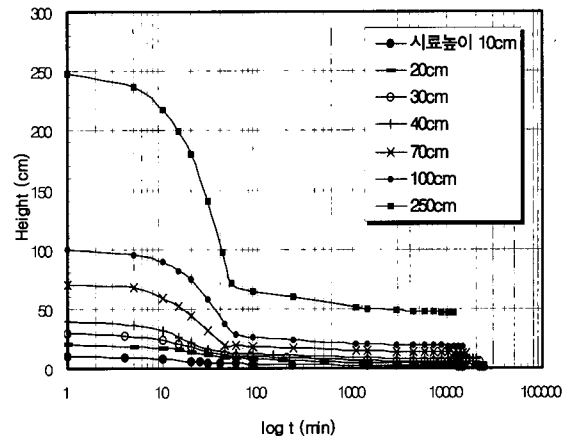
(a) S-C : 0%



(b) S-C : 10%



(c) S-C : 30%



(d) S-C : 50%

그림 17. S-C별 시간경과에 대한 계면고변화

에서는 투기시 상부로 배출된 간극수의 영향이 적어 응집과 침강구간이 명확하지 않는 압밀침강의 형태를 띤다고 판단된다.

시험결과 각 시료높이별 재초기화 곡선의 개시점은 矢野弘一郎(1985)가 제시한 침강곡선에서의 변곡점에 해당하였다. 따라서 선형을 보이는 재초기화 곡선이 자중압밀단계임을 보여준다.

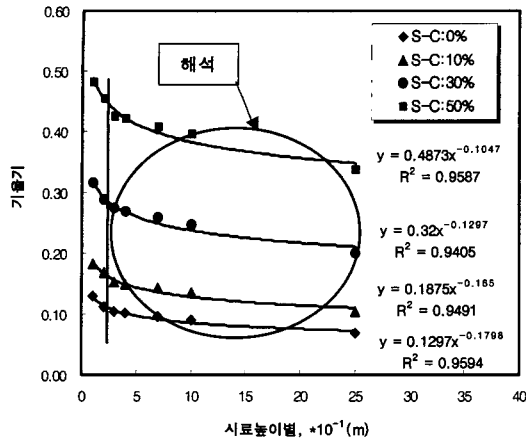
#### 4.3.3 시료높이별 재초기화 곡선의 기울기, $\alpha$ 와 절편, $\beta$

그림 18은 각 시료높이별로 재초기화한 결과 S-C에 대하여 단계별 재초기화 직선의 기울기와 절편을 나타낸 결과이다. 해석하고자 하는 단계는 시료높이 10, 20cm의 압밀침강이 아닌 구간침강이나 분산침강의 형태를 가지게 되므로 30cm 이후의 기울기와 절편의 값을 이용하는게 타당하다고 판단된다. 표 3은 전체시료높이별로 재초기화한 결과와 시료높이 10, 20cm를 제거하고

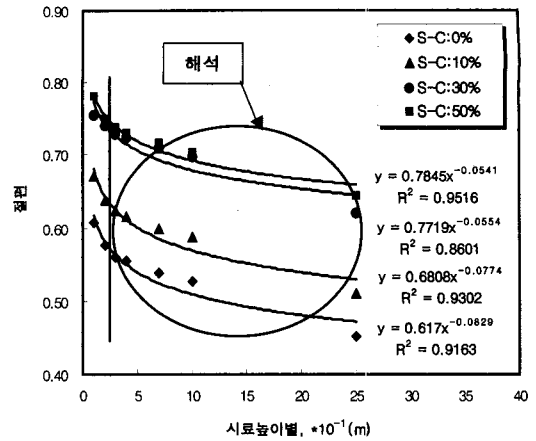
S-C에 따라서 재초기화한 결과를 보여주며 그 결과 재초기화 곡선의 기울기와 절편은 지수함수형태로 감소하였고 상관계수가 거의 1인 높은 상관성을 보여준다. 재초기화 곡선의 기울기와 절편을 지수함수의 형태로 보는 다른 이유는 그림 14에서 시료높이별로 자연대수의 형태로 증가하는 침강압밀계수의 역수가 곧  $1/S$  vs  $t$ 에서 자중압밀단계인 재초기화 곡선의 기울기에 해당하기 때문이다. 그러므로 누승의 형태보다는 지수함수의 형태를 가지게 되는 게 타당하다고 판단된다.

#### 4.3.4 소요투기일수에 맞는 재초기화된 직선

표 4는 소요투기일수에 맞는 재초기화된 직선을 산정한 결과이며, 표 3에서 구한 S-C에 따른 시료높이별 재초기화 곡선의 기울기와 절편의 관계식에서 소요투기일수에 따른 재초기화시킨 직선의 기울기와 절편을 도출한 결과이다. 소요투기일수에 맞는  $\alpha$ ,  $\beta$  산정은 먼저



(a) 재초기화 곡선의 기율기



(b) 재초기화 곡선의 절편

그림 18. S-C별 시료높이에 따른 재초기화 곡선의 기율기와 절편

표 3. S-C별 침강형태에 따른 재초기화된 직선 관계식

S-C (%)	압밀침강형태를 포함한 재초기화된 직선		구간, 분산침강형태의 재초기화된 직선	
	기율기	절편	기율기	절편
0	$y=0.1297x^{-0.1798}$ $R^2=0.9594$	$y=0.617x^{-0.0829}$ $R^2=0.9163$	$y=0.1088e^{-0.0184x}$ $R^2=0.9938$	$y=0.5785x^{-0.0098x}$ $R^2=0.9988$
10	$y=0.1875x^{-0.165}$ $R^2=0.9491$	$y=0.6808x^{-0.0774}$ $R^2=0.9302$	$y=0.1610e^{-0.0176x}$ $R^2=0.9954$	$y=0.6377x^{-0.0088x}$ $R^2=0.9990$
30	$y=0.320x^{-0.1297}$ $R^2=0.9405$	$y=0.7719x^{-0.0554}$ $R^2=0.8601$	$y=0.2863^{-0.0144x}$ $R^2=0.9947$	$y=0.7458x^{-0.0073x}$ $R^2=0.9985$
50	$y=0.4873x^{-0.1047}$ $R^2=0.9587$	$y=0.7845x^{-0.0541}$ $R^2=0.9516$	$y=0.4398^{-0.0107x}$ $R^2=0.9989$	$y=0.7467x^{-0.0058x}$ $R^2=0.9983$

표 4. S-C별 계획계면고 6m일 경우 소요투기일수에 맞는 재초기화된 직선

S-C (%)	계획 계면고 (cm)	퇴적고 상승속도 (cm/day)	소요 투기일수 (day)	$\alpha$	$\beta$	재초기화된 직선
0	600	3.395	177	0.0045	0.1023	$y=0.0045t'+0.1023$
10	600	3.048	197	0.0051	0.1126	$y=0.0051t'+0.1126$
30	600	2.428	247	0.0082	0.1271	$y=0.0082t'+0.1271$
50	600	1.990	301	0.0176	0.1297	$y=0.0176t'+0.1297$

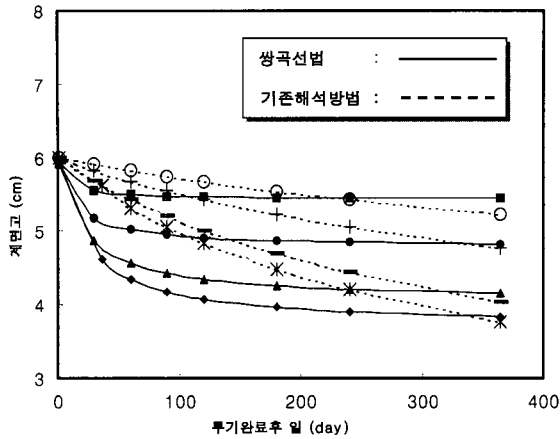
그림 8의 시간경과에 대한 계면고 변화에서 투기 후 1일 퇴적고 상승속도를 파악한 후 계획하는 계면고와 투기 속도에 따라서 소요되는 투기일수를 산정한다. 그리고 나서 각 단계별  $t/S$  vs  $t$  와의 관계에서 침강단계를 제외한 부분을 재초기화 곡선의 기율기,  $\alpha$ 와 절편,  $\beta$ 를 구한다. 앞서 구한 소요투기일수에 맞는  $\alpha$ ,  $\beta$ 를 시료높이별 추세선의 수식에서 구한 뒤 재초기화시킨 직선을 구할 수 있다. 여기서  $t'$ 는 재초기화된 시간을 말한다.

#### 4.3.5 침하량 및 체적비 예측과 비교

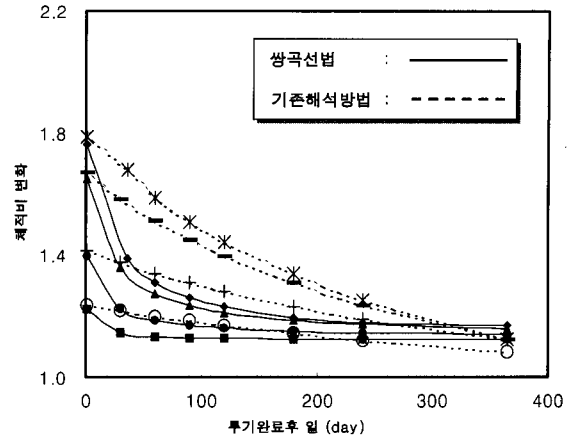
표 4의 재초기화된 직선에서 투기완료 후 시간경과에 대한 계면고 변화량을 구할 수 있으며 계면고와 실질토

량고 관계에서 간극비를 구한 후 함수비와 체적비를 구할 수 있다. 표 5는 S-C에 따라 용이하게 구분하기 위하여 적용한 기호들이다. 계면고를 6m로 계획할 때 그림 19에는 쌍곡선에 의한 새로운 방법과 기존의 경험적인 방법으로 S-C에 따라 투기완료 후 시간경과에 대한 계면고와 체적비변화를 보여준다. 투기완료 후 시간경과에 대한 계면고, 체적비 변화를 두 방법으로 비교하였을 때 초기 60일 이전의 부분에서 커다란 차이를 보였으며, 60일 이후에는 점차로 그 폭이 감소하면서 1년에 가까워질수록 거의 근사한 예측치를 보여주고 있다.

이러한 커다란 차이를 보이는 투기종료 후 60일 까지의 변화를 더욱 자세히 설명하기 위하여 시료높이 250cm



(a) 시간경과에 대한 계면고 변화



(b) 시간경과에 대한 체적비 변화

그림 19. 쌍곡선법을 이용한 계면고 및 체적비 변화 비교

표 5. S-C별 적용된 기호

구 분	S-C별 적용된 기호			
	0%	10%	30%	50%
기존의 해석방법	*	—	+	○
쌍곡선법	◆	▲	●	■

의 경우 최종 투기완료 후 경과시간과 계면고간의 최대 기울기를 S-C별로 비교한 결과를 표 6에서 보여주고 있다. 표 6에서와 같이 쌍곡선법을 응용한 방법이 실내시험의 결과와 잘 일치하였으며 기존의 제시된 경험적인 방법보다 모래를 혼합한 지역에 더욱 합리적이라고 판단된다.

### 5. 결론

본 연구에서는 국내 현장조건과 모래가 혼합된 지역을 고려한 준설토의 퇴적 및 압밀특성을 파악하기 위하여 준설토의 전체건조시료중 모래혼합비율을 각각 0, 10, 30, 50%로 제조하여 매일의 단계별투기에 의하여 침강 및 자중압밀시험을 실시하였다. 실내시험결과를 이용하여 기존에 제시된 경험적인 해석방법과 쌍곡선법을 응용한 새로운 방법에 의하여 투기완료 후 S-C에 따라 시간경과에 대한 계면고, 체적비 변화를 예측, 비교하였다.

(1) 자중압밀이 완료된 후 심도별 입도분포 및 컨시스턴시 특성을 파악한 결과 단계투기에 의하여 심도별로 지그재그형태를 보이며 모래혼합비율이 증가할수

표 6. S-C별 투기종료 후 기울기 비교

구 분	S-C별 투기종료 후 기울기			
	0%	10%	30%	50%
실내시험 (cm/day)	2.600	2.386	1.795	1.485
쌍곡선법 (cm/day)	2.644	2.378	1.755	1.465
기존의 해석방법 (cm/day)	1.276	1.034	0.552	0.345

록 심도별 평균 액성한계와 소성지수는 선형적으로 감소하였다. 특히 액성한계에 대한 S-C가 65%이하 일 때 준설 후 퇴적토의 컨시스턴시에 영향을 많이 끼치는 것으로 판단된다.

- (2) 본 실내시험을 통하여 심도별 모래와 점토의 층상조직을 분리시켜 S-C에 따라 점토성분만의 침하량과 간극비를 계산한 결과, 층상조직에 의한 계면고 변화는 투기완료 후 시간이 경과하면서 S-C에 따라 자연대수형태로 증가하였고, 점토간극비는 시료높이 별로 약간의 차이는 있으나 S-C가 0%와 50%의 경우 투기완료 후 시간이 아무리 경과되더라도 각각 2와 4이하가 될 수 없음을 보였다.
- (3) 시험결과 침하와 시간의 관계에서 재초기화 곡선의 개시점은 矢野弘一郎가 제시한 침강곡선의 변곡점에 해당하였다. 이는 재초기화 곡선이 자중압밀단계임을 보여주며 직선의 관계식과 상관계수가 거의 1인 재초기화 곡선의 거동으로 압밀특성을 파악할 수 있음을 보여준다.
- (4) 재초기화 곡선의 기울기와 절편을 산정할 때, 시료높이 10, 20cm를 포함한 누승의 형태보다는 예측하고자하는 단계의 구간, 분산침강의 형태를 보이는

30cm이후 전체높이별 지수함수의 형태로 파악하는  
 게 타당하다고 판단된다.

- (5) 대략적으로 자중압밀시점을 구하여 계면고변화를  
 산정하는 기존의 경험적인 방법보다는 시료높이별  
 로 계면고변화를 고려하고 최종 투기완료 후 시간경  
 과에 대한 계면고간의 기울기가 시험결과와 잘 일치  
 하는 쌍곡선법을 응용한 예측방법이 모래의 영향을  
 고려한 지역에서 준설 매립 할 경우 더 합리적이라  
 고 판단된다.

### 참 고 문 헌

1. 이송, 강명찬(2000), "단계 투기법에 의한 준설점토의 체적비 산  
 정", 한국지반공학회 논문집, 제16권, 제1호, pp.167~178.
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, pp.1~14.
3. Been, K. and Sills, G. C.(1981), "Self-Weight Consolidation of  
 Soft Soils : An Experiment and Theoretical Study", *Geotechnique*,  
 31, pp.519~535.
4. Fukue, M., Okusa, S., and Nakamura, T.(1986), "Consolidation of  
 Sand-Clay Mixtures", *Consolidation of soils : Testing and Evaluation*,  
 ASTM, pp.627~641.
5. Gibson, R.E., England, G.L., and Hussey, M.J.L.(1967), "The  
 Theory of One-Dimensional Consolidation of Saturated Clays, I.  
*Finite Non-Linear Consolidation of Thin Homogeneous Layers*",  
*Geotechnique*, Vol.17, pp.261~273.
6. Imai, G., Tsuruya, K. and Yano, K.(1979), "A Treatment of  
 Salinity in Water Content Determination of Very Soft Clays", *Soil  
 & Foundations*, Vol.19, No.3, pp.84~89
7. Imai, G.(1981), "Experimental Studies on Sedimentation Mechanism  
 and Sediment Formation of Clay Materials", *Soil and Foundation*,  
 Vol.21, No.1, pp.7~20
8. Kynch, E. J.(1952), "A Theory of Sedimentation", *Transaction of  
 the Faraday Society*, No.48, pp.166~176.
9. Kumar, G.V. and Wood. D.M.(1999), "Fall cone compression tests  
 on clay-gravel mixtures", *Geotechnique*, Vol.49, No.6, pp.727~739.
10. Lee, K. and Sills, G.C.(1981), "The Consolidation of A Soil Stratum,  
 Including Self-Weight Effects and Large Strains", *Numerical and  
 Analytical Methods in Geomechanics*, Vol.5, pp.405~428.
11. Mikasa, M. and Takada, N.(1984), 1984, "Self-weight Consolidation  
 of Very Soft Clay Centrifuge", *Proceedings, ASCE Symposium  
 on Consolidation and Sedimentation*, pp.121~140.
12. Seed, H.B.(1964), "Fundamental aspects of the Atterberg Limit",  
*Jour. Soil Mechanics and Foundation Division*, Vol. 90, No.SM6,  
 pp.75~89.
13. Tan, T. S., Goh, T.C., Karunaratne, G.P., and Lee, S. L.(1990),  
 "Shear Strength of very Soft Clay-Sand Mixtures", *Geotechnical  
 Testing Journal*, Vol.17, pp.27~34
14. Tan, T. S., Inoe, T., and Lee, S.L.(1991), "Hyperbolic method for  
 Consolidation Analysis", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.117,  
 N0.11, pp.1723~1737.

(접수일자 2001. 12. 5, 심사완료일 2002. 4. 8)