

## 점층 재하를 고려한 선행재하 공법 적용 연약지반의 현장 계측을 통한 침하량 예측 방법의 개발

### Prediction Method of Settlement Based on Field Monitoring Data for Soft Ground Under Preloading Improvement with Ramp Loading

우상인<sup>1)</sup>, Sanginn Woo, 윤찬영<sup>2)</sup>, Chan-Young Yune, 백승경<sup>3)</sup>, Seung Kyung Baek, 정충기<sup>4)</sup>, Choong-Ki Chung

<sup>1)</sup> 서울대학교 건설환경공학부 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil and Environment Engineering,  
Seoul National University

<sup>2)</sup> 강릉대학교 토목공학과 전임강사, Full-time Lecturer, Dept. of Civil Engineering,  
Kangnung National University

<sup>3)</sup> 한국전력기술 기술원, Engineer, Korea Power Engineering Company, INC

<sup>4)</sup> 서울대학교 건설환경공학부 교수, Professor, Dept. of Civil and Environment Engineering,  
Seoul National University

**SYNOPSIS** : Previous settlement prediction method based on settlement monitoring such as hyperbolic, monden method were developed under instantaneous loading condition and have restriction to be applied to soft ground under ramp loading condition. In this study, settlement prediction method under ramp loading was developed. New settlement prediction method under ramp loading considers influence factors of consolidation settlement and increase accuracy of settlement prediction using field monitoring data after ramp loading. Large consolidation tests for ideally controlled one dimensional consolidation under ramp loading condition were performed and the settlement behavior was predicted based on the monitoring data. As a result, new prediction method is expected to have great applicability and practicability for the prediction of settlement behavior.

**Key words** : Soft Ground, Settlement, Field Monitoring, Root S, Hyperbolic, Ramp Loading

## 1. 서 론

현장계측 자료를 이용하여 연약지반의 향후의 침하거동을 예측하는 Monden 법(1963), Asaoka 법(1978), Hyperbolic 방법(1991),  $\sqrt{S}$  방법(1998) 등은 모두 즉시재하 조건을 가정하고 개발된 방법이다. 하지만 실제 연약지반 개량 시에는 연약지반의 안정성 등을 고려하여 장기간에 걸쳐서 성토하중을 증가시키고 또한 성토기간이 전체 지반개량 기간의 상당부분을 차지하므로 이러한 점층재하 지반에 기존의 예측방법을 적용하기에는 많은 제약이 있다.

이에 따라 최근에 계측자료를 기반으로 점층재하 지반의 침하거동을 예측할 수 있는 방법이 제안되었으나(윤찬영 등, 2007), 성토하중의 크기, 배수거리, 재하속도 등 침하거동에 영향을 미치는 여러 영향인자를 고려하지 않아서 다양한 현장에 적용하기에 한계가 있으며, 점층재하 과정에서의 자료만을 이용하므로 점층재하 완료 이후에는 예측정확도를 높일 수 없다는 단점이 있다. 본 연구에서는 기존의 점층재하 예측기법과는 달리 지반의 배수거리, 하중조건과 같은 침하거동에 영향을 미치는 인자를 고려할 수 있도록 하였으며, 점층재하 이후에도 계측자료를 활용하여 침하거동의 예측정확도를 높일 수 있도록

하였다. 제안된 방법의 적용성 및 신뢰성은 대형 압밀 실험 결과를 이용하여 검증하였다.

## 2. 점증하중 재하 지반의 침하거동

Olson(1977), Tang과 Onitsuka(2000), Zuh와 Yin(2001) 등은 점증하중이 재하되는 지반의 압밀거동을 이론적으로 풀어냈다. 이들의 연구에서 평균압밀도와 시간의 관계는 점증하중이 재하완료된 시점, 즉 성토가 완료되는 시점을 기준으로 이전과 이후가 서로 다른 곡선식으로 나타나게 된다. 이 때 Tang과 Onitsuka(2000)는 점증하중이 재하완료되는 시점인 두 곡선의 경계점에서 압밀도의 변화율이 최대가 되며, 시간계수-압밀도 곡선(또는 시간-침하 곡선)에서 변곡점으로 나타난다고 하였다. 한편 Carrillo(1942)는 연직 및 방사 배수가 동시에 발생하는 즉시하중 재하 지반의 압밀해석 시에 연직방향과 방사방향 배수조건의 해를 각각 계산하여 조합하는 것으로 정확한 압밀해를 계산할 수 있다고 하였으나, 점증하중이 재하되는 조건의 압밀은 즉시하중 재하 조건의 압밀과 달리 Carrillo의 법칙이 성립하지 않는다(Tang과 Onitsuka, 2000). 따라서 점증하중 재하 지반에 대해서는 Carrillo의 법칙에 따라 연직방향과 방사방향 배수조건의 해를 각각 계산하여 조합하는 것으로는 정확한 압밀해를 계산할 수 없다.

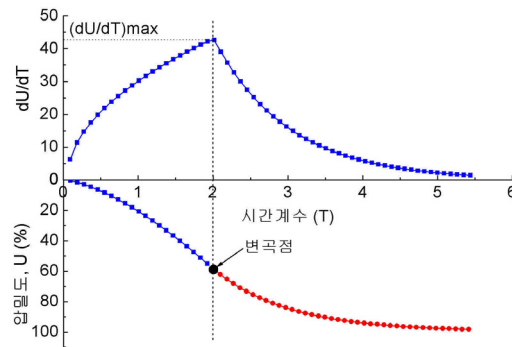


그림1. 점증하중 재하시 평균압밀도 곡선에서 변곡점의 위치

따라서, 본 연구에서는 점증하중 재하조건에서 연직방향과 방사방향 흐름을 동시에 고려하고 이와 함께 압밀 중 위치별 물성치 변화를 고려한 엄밀해석을 실시하기 위하여 윤찬영 등(2007)에 의하여 제안된 유한차분 해석을 실시하였다. 통일분류법에 따라 CL 점성토로 분류되는 정규압밀 재성형 카올리나이트의 특성(표 1)을 기반으로 해석을 실시하였다.

표 1. 재성형 카올리나이트의 입력 물성치 (Yune과 Chung, 2005)

Plasticity index (%)	17
Percentage finer than #200 sieve (%)	98.0
Initial void ratio	0.970
Compression index, $C_c$	0.294
Initial vertical permeability, $k_{v0}$ (m/s)	$1.67 \times 10^{-9}$
Initial horizontal permeability, $k_{ho}$ (m/s)	$2.5 \times 10^{-9}$
Initial effective vertical stress (Maximum past pressure, kPa)	100
Change of vertical permeability index, $C_{kv}$	0.332
Change of horizontal permeability index, $C_{kh}$	0.365

사용한 차분망은 20×20으로 구성하였으며, 시료의 크기는 높이 200 mm에 대하여 전체직경을 300 mm, 360 mm 두 가지 경우, 그리고 배수재 직경 30 mm, 60 mm에 대하여 해석을 수행하였다. 또한, 재하하중의 크기와 점증하중 재하시간을 각각 50, 80, 120 kPa 및 3, 5, 7, 10, 12, 15 hr로 변화시켜 가면서 총 54회의 해석을 실시하였다. 해석 조건은 표 2와 같다.

표 2. 수행된 해석 조건

시료직경 (mm)	배수재 직경 (mm)	응력증분(kPa)	점증하중 재하시간 (hr)
300	60	50	3, 5, 7, 10, 12, 15
		80	3, 5, 7, 10, 12, 15
		120	3, 5, 7, 10, 12, 15
360	60	50	3, 5, 7, 10, 12, 15
		80	3, 5, 7, 10, 12, 15
		120	3, 5, 7, 10, 12, 15
	30	50	3, 5, 7, 10, 12, 15
		80	3, 5, 7, 10, 12, 15
		120	3, 5, 7, 10, 12, 15

해석 결과인 그림 2에서 확인할 수 있는 것과 같이 수치해석을 통한 엄밀해석 결과 성토완료시점 이전에 항상 변곡점이 나타나는 것을 알 수 있으며, 성토완료시점과 변곡점의 관계는 식 (1)과 같이 나타난다.

$$t_p = 0.7t_c + 1252.0 \quad (1)$$

여기서  $t_p$  : 변곡점까지의 시간 (sec)  
 $t_c$  : 성토완료까지의 시간 (sec)

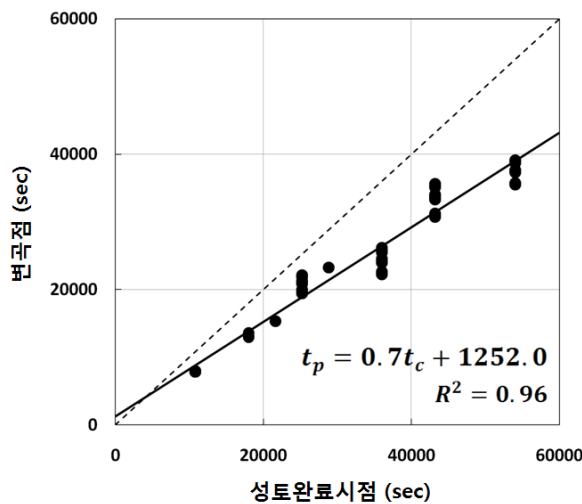


그림 2. 성토완료 시점과 변곡점의 관계

또한 유한차분 해석 결과로 얻어진 대상지반의 변곡점 이전의 침하량을 그림 3과 같이 축변환 하면 식 (2)와 같은 선형회귀식을 얻어낼 수 있다. 성토기간과 연약층의 두께에 따른 침하 거동을 정규화 시키기 위해서 침하량은 연약층의 두께로 나누었으며, 시간은 변곡점 발생 시점을 기준으로 구분하였다. 변곡점

이전의 선형회귀식에서 직선의 기울기는  $\alpha$ 로 나타낼 수 있으며, 시간이 0인 지점에서의 침하량은 이론적으로 발생하지 않아야 하므로 y축과의 교점은 0으로 설정하여 선형회귀를 수행하였다.

변곡점 이후의 침하량은 그림 4와 같이 축변환 하여 식 (3)과 같은 선형회귀식을 얻을 수 있다. 이 경우에도 연약층의 두께에 따른 침하 거동을 정규화 시키기 위해서 침하량을 연약층 두께로 나눈 후 축변환을 수행하였다. 변곡점 이후의 선형회귀식에서 직선의 기울기는  $\alpha'$ 로 나타나며 y축과의 교점은  $\beta'$ 으로 나타낼 수 있다. 따라서 대상지반에 대해서 식 (2), (3)에서 결정되는 계수  $\alpha, \alpha', \beta'$ 을 이용하면 지반의 침하거동을 예측 할 수 있으며 최종침하량은 식 (4)과 같이 결정된다.

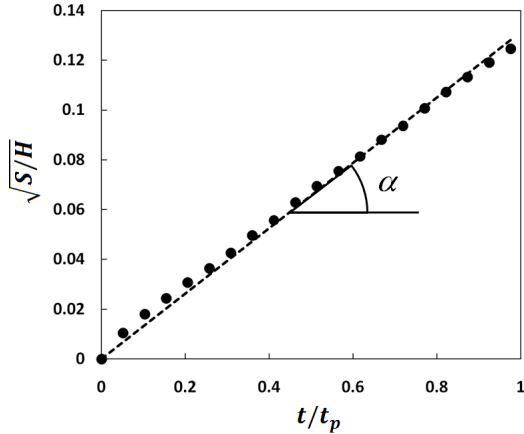


그림 3. 축 변환된 침하곡선 (변곡점 전)

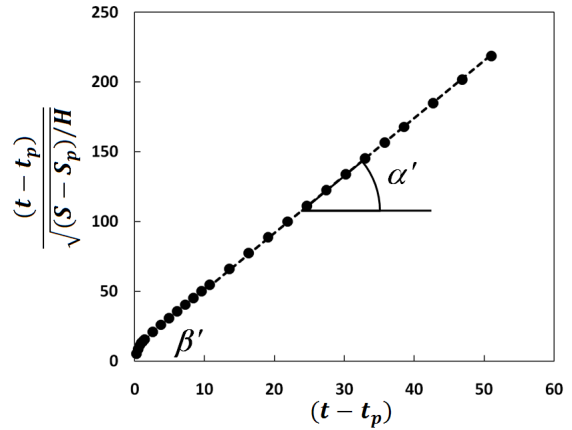


그림 4. 축 변환된 침하곡선 (변곡점 후)

$$S = (\alpha t/t_p)^2 H \quad (t \leq t_p) \quad (2)$$

$$S = \left( \frac{t - t_p}{\alpha' (t - t_p) + \beta'} \right)^2 H + S_p \quad (t \geq t_p) \quad (3)$$

$$S_f = \frac{1}{\alpha'^2} H + S_p \quad (4)$$

- 여기서  $S$  : 시간  $t$ 에서의 침하량  
 $S_p$  : 변곡점에서의 침하량  
 $t_p$  : 변곡점까지의 시간  
 $H$  : 연약층 두께  
 $\alpha$  : 변곡점 이전 회귀선의 기울기  
 $\alpha'$  : 변곡점 이후 회귀선의 기울기  
 $\beta'$  : 변곡점 이후 회귀선의 절편

### 3. 점증하중 재하 지반의 침하 거동 예측

향후 계획된 성토고에 대한 침하 거동 전체를 예측하기 위해서는 침하량 산정에 필요한 계수인  $\alpha, \alpha'$ 과  $\beta'$  값들이 점증 재하 중에도 결정되어야 한다.  $\alpha$ 값은 점증하중이 재하되면서 침하가 발생하면, 그 결과를 식 (2)에 적용하여 재하 초기에 바로 결정할 수 있다. 반면에  $\alpha'$ 과  $\beta'$ 는 변곡점 이후의 침하량 평가에 관련된 값이므로 점증하중 재하되는 초기에는 바로 결정하기는 어렵다. 그러나  $\alpha'$ 과  $\beta'$ 는

동일 지반의 침하에 관련된 계수라는 점에서  $\alpha$  값과 밀접한 관련이 있다.

표 2에 제시된 다양한 조건에 대한 유한차분 해석 결과, 변곡점 전, 후의 두 곡선을 축 변환하여 얻어진 계수  $\alpha$ 와  $\alpha'$ 는 그림 5와 같다. 그림 5에서 각각의 하중 증분에 대해서  $\alpha$ 와  $\alpha'$ 관계의 특정한 경향성을 볼 수 있다.  $\alpha'$ 는 식 (4)에서 볼 수 있듯이 최종침하량과 관계된 계수이다. 압밀침하에서 최종침하량은 하중증분, 선행압밀하중, 연약층의 두께의 영향을 받으므로 이를 고려하여  $\alpha$ 와  $\alpha'$ 관계를 수정할 수 있으며, 수정한  $\alpha$ 와  $\alpha'$ 관계의 관계는 그림 6과 같고, 관계식은 식 (5)와 같다.

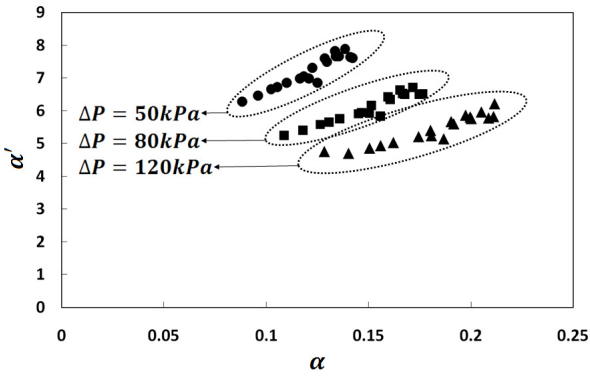


그림 5. 계수  $\alpha$ 와  $\alpha'$ 의 관계

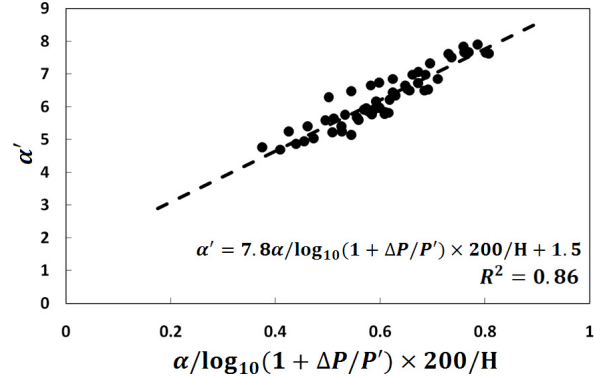


그림 6. 하중조건, 시료조건을 고려한  $\alpha$ 와  $\alpha'$ 의 관계

$$\alpha' = 7.8\alpha \frac{200/H}{\log_{10}(1 + \Delta P/P)} + 1.5 \quad (5)$$

여기서  $H$  : 연약층 두께 (mm)  
 $\Delta P$  : 성토하중 (kPa)  
 $P$  : 선행 압밀하중 (kPa)

식 (3)에서  $\beta'$ 는 침하곡선의 형태와 관련된 계수이다.  $\beta'$ 값이 작을수록 침하곡선은 최종침하량에 빠르게 근접한다. 따라서  $\alpha$ 와  $\beta'$ 관계에 영향을 주는 요소로는 침하속도에 영향을 주는 요소이다. 압밀침하 속도에 영향을 주는 요소로는 하중 재하 속도와 배수거리가 있다. 이러한 요소들을 고려하여  $\alpha$ 와  $\beta'$ 관계를 산정하면 그림 7과 같고, 관계식은 식 (6)과 같다.

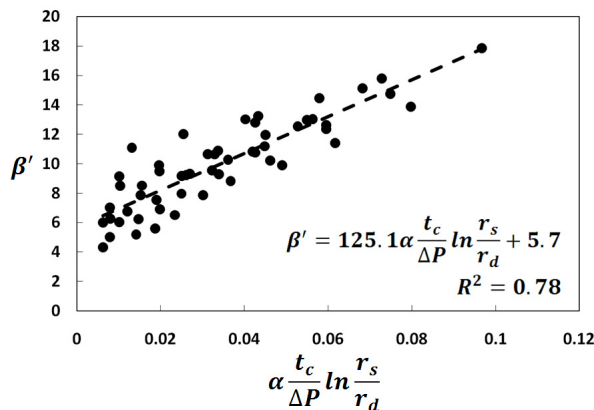


그림 7. 계수  $\alpha$ 와  $\beta'$ 의 관계

$$\beta = 125.2\alpha \frac{t_c}{\Delta P} \ln \frac{r_s}{r_d} + 5.7 \quad (6)$$

- 여기서  $t_c$  : 성토완료 시점 (hr)  
 $\Delta P$  : 성토하중 (kPa)  
 $r_s$  : 유효 배수 반경  
 $r_d$  : 배수재의 반경

앞서 제안된 방법은 변곡점 이전의 초기 계측자료만을 이용하여  $\alpha$ 를 산정할 수 있으며, 식 (5), (6)을 이용하여  $\alpha'$ ,  $\beta'$ 를 산정할 수 있다. 산정된  $\alpha'$ ,  $\beta'$ 와 식 (3)을 이용하여 변곡점 이후의 침하거동을 예측할 수 있다. 변곡점 이후의 침하 데이터가 있는 경우에도 쌍곡선법을 근간으로 한 다음과 같은 방법을 이용하여 예측결과를 지속적으로 보정, 정확도를 향상시킬 수 있다.

먼저 변곡점 이후의 새로 계측된 자료와 계측이 이루어진 시점에서의 기존의 예측값의 차이만큼 침하 예측곡선을 평행이동 시킨다(그림 8 (a)). 수직 평행이동된 침하 예측 자료에서 성토완료 시점( $t_c$ )과 성토완료 시점의 두배 되는 시점( $2t_c$ )사이의 침하 예측자료만을 이용하여 그림 8 (c)와 같이 축변환을 실시하고 계수  $\alpha''$ ,  $\beta''$ 를 구한 후, 산정된 계수값을 이용하여 침하곡선을 재보정한다(그림 8 (d)). 이러한 과정을 통하여 변곡점 이후에도 예측결과를 지속적으로 보정하고 정확도를 향상시킬 수 있도록 하였다.

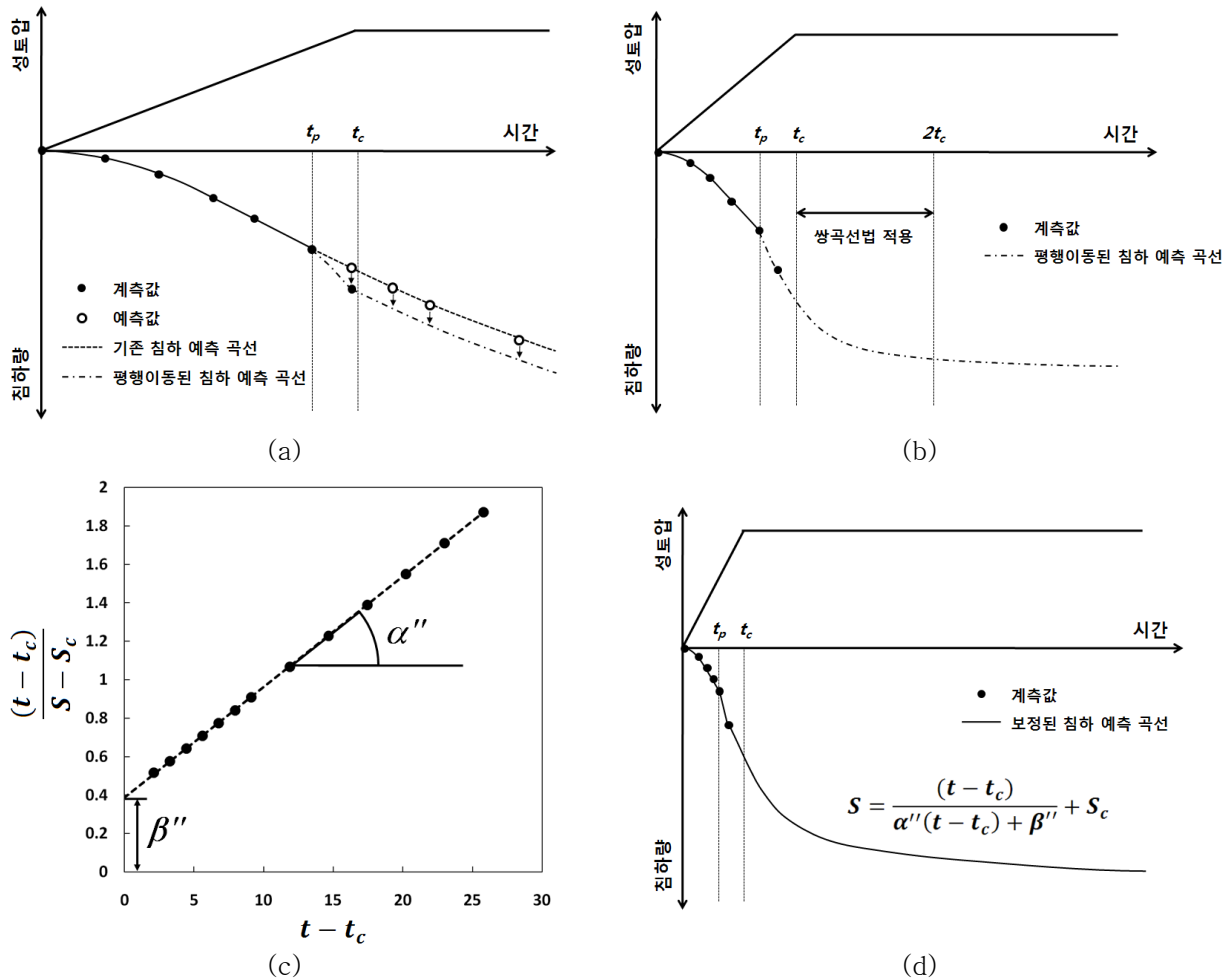


그림 8. 변곡점 이후 데이터를 이용한 침하거동 보정

#### 4. 침하거동 예측 이론의 적용 및 평가

제안된 예측이론의 정확성과 타당성을 검증하기 위하여 카올리나이트 성형시료를 이용한 대형압밀시험을 실시하고, 제안된 예측 방법을 적용하였다. 대형압밀시험기의 제원은 그림 9와 같이 내경 360 mm, 높이 370 mm이고, 컴프레서에서 나오는 공기압을 시험기 상부의 다이어프램에 가하여 시료에 하중을 가하도록 되어있다. 압밀 중 시료에서 배출되는 유량과 시료의 연직 변형을 측정할 수 있으며 시험기 하부에는 여러 위치에 바늘 삽입구를 설치하여 필요한 경우 원하는 위치에서 과잉간극수압을 측정할 수 있다. 시험과정에서 측정되는 배출유량, 연직변형량, 위치별 간극수압과 같은 자료는 시험 중 연속적으로 측정되며, 그림 6와 같이 스위치 박스와 데이터 수집 시스템을 통하여 컴퓨터에 저장되고, 시험중에는 각 데이터를 그래프를 이용하여 실시간으로 확인할 수 있다.

시험과정은 크게 시료준비, 시료성형, 연직배수재 삽입 및 방사배수 조건에서의 점증재하 압밀의 세부분으로 나누어진다. 우선 먼저 시료준비 과정에서는 카올리나이트 분말을 100%의 함수비로 물과 혼합한 후 교반기에서 진공압을 가하면서 2~3일간 교반을 한다. 이 때 물 1 리터당 약 16g의 소금(NaCl)을 첨가하여 시료를 면모화하였고, 0.01%의 아지화 나트륨( $\text{NaN}_3$ )을 첨가하여 시료성형 중에 곰팡이 발생 및 미생물의 번식을 방지하였다(Seah, 1990).

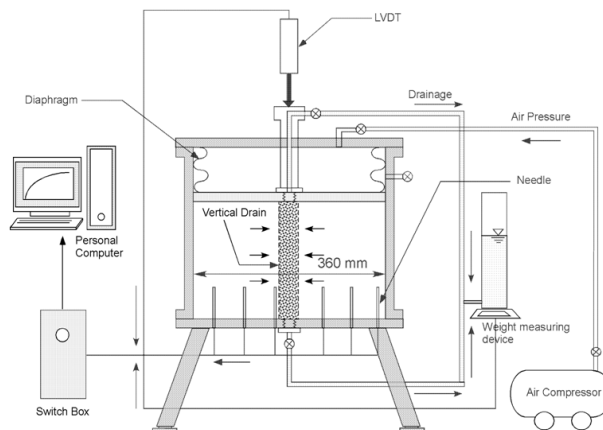


그림 9. 대형압밀시험기

시료 내의 공기가 제거되고 물과 완전히 혼합된 카올리나이트 슬러리는 대형압밀시험기로 이동되며 퇴적과 자중압밀에 의하여 1~2 일 동안 압축이 된다. 이 때 압밀시험기 내부는 약 1 mm 두께로 실리콘 그리스를 도포하여 시료 성형 중에 그리고 압밀 재하 중에 발생할 수 있는 마찰을 최소화하였다. 이후 단계적으로 하중을 증가시키며 상부배수조건에서 최종적으로 약 100 kPa까지 재하, 압밀하여 시료를 성형하였다. 각 단계마다 침하량, 간극수 배출량 및 높이별 간극수압을 측정하여 압밀이 완료되었음을 확인하였으며, 최종 시료성형까지 2 주 정도가 소요되었다.

성형이 완료되면 시료에서 하중을 제거하고, 외경 38 mm, 두께 1 mm를 갖는 중공형 맨드릴을 이용하여 주변지반의 교란을 최소화하면서 시료 중앙부에 구멍을 뚫는다. 이 후 시료중앙부의 구멍에 물을 채우고 느슨하게 모래를 부어넣어 연직배수재를 설치하고 점증하중을 재하하여 압밀시험을 실시하였다. 총 2회의 실험을 실시하였으며 첫 번째 실험은 측정된 선행압밀하중인 95 kPa에서 60 kPa의 추가 하중을 10 kPa/hr의 속도로 재하한 후 최종 155 kPa을 약 50시간 동안 유지하였고, 두 번째 실험은 100 kPa에서 50 kPa의 하중을 6.25 kPa/hr의 속도로 재하한 후 최종 150 kPa의 하중을 약 60시간 동안 유지하여 점증하중 재하조건을 모사하였다.

대형압밀시험에서 얻어진 침하 계측 자료 중 성토완료 이전의 하중 재하 초기자료를 본 연구에서 제안된 방법에 적용하여 이후의 침하거동을 예측하였다. 총 두 번의 대형압밀실험에 대해서 전체 실험 시간 중 초기 4%의 침하 데이터와 변곡점까지의 침하 데이터를 이용하여 각각 침하예측을 수행하였다. 두

번의 대형압밀실험에 대한 침하거동 예측결과는 그림 10과 표 3에 정리되어 있다.

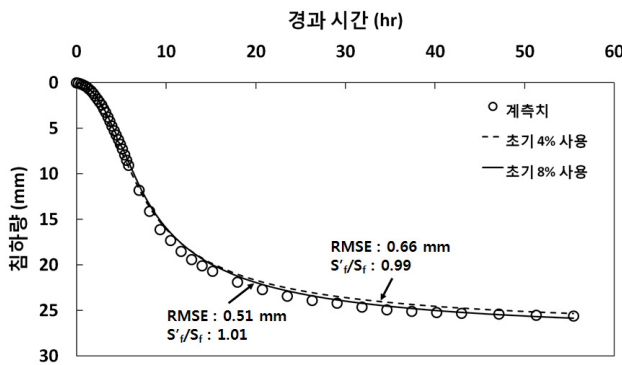
표 3에서 계측최종침하량과 예측최종침하량의 비율과, 식 (7)과 같이 산정되는 RMSE(Root Mean Square Error)를 바탕으로 보았을 때, 첫 번째 실험의 경우 최종침하량에 대한 오차율이 2 % 이내이고 RMSE도 1 mm 이내로 그 오차가 매우 적으며 침하거동을 잘 예측하고 있는 것으로 나타났다. 두 번째 실험의 경우도 최종침하량에 대한 오차율이 10% 이내이며, RMSE는 2.5mm이내로 오차가 조금 커지는 하였으나 여전히 침하거동을 잘 예측하고 있다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - S'_i)^2}{n}} \quad (7)$$

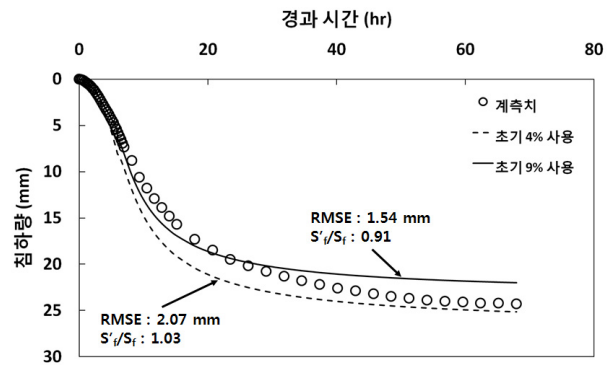
여기서  $S_i$  : 실제 발생 침하량  
 ,  $S'_i$  : 예측 침하량  
 $n$  : 총 계측 횟수

표 3. 예측조건 및 예측 결과 (변곡점 이전 자료 사용)

	자료 사용 구간	계측최종침하량, $S_f$ (mm)	예측최종침하량, $S'_f$ (mm)	$S'_f/S_f$	RMSE (mm)
실험1	초기 4%	25.60	25.32	0.99	0.67
	변곡점까지의 자료 (초기 8%)	25.60	25.85	1.01	0.51
실험2	초기 4%	24.30	25.14	1.03	2.07
	변곡점까지의 자료 (초기 9%)	24.30	22.02	0.91	1.54



(a) 실험 1에 대한 예측 결과



(b) 실험 2에 대한 예측 결과

그림 10. 점증하중 재하시 침하거동 및 예측 결과 (변곡점 이전)

실험 2에 대해서 본 연구에서 제안된 변곡점 이후의 데이터를 이용한 침하 예측 정확도 향상기법을 적용하고, 기존의 침하예측 방법(쌍곡선법)과 비교하였다.

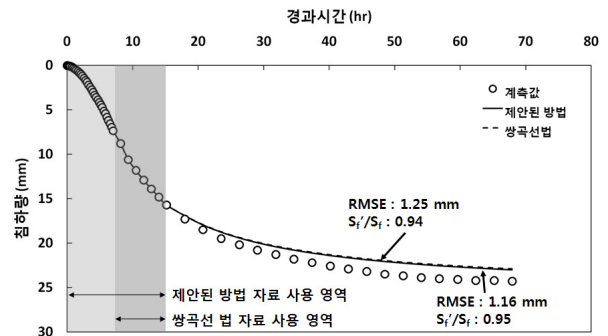
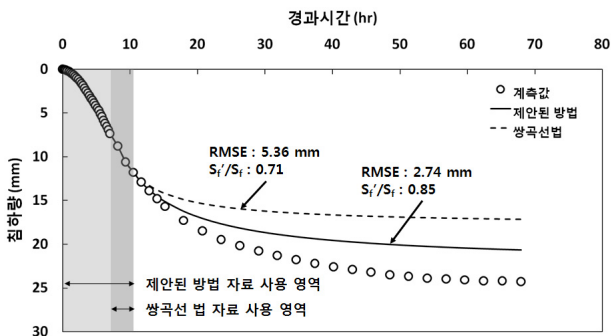
총 실험 시간 중 초기 15%, 22% 자료를 이용하여 침하예측을 수행하였으며, 각각 해당되는 성토완료 이후의 자료를 이용하여 쌍곡선법을 수행하여 비교하였다. 침하거동 예측 결과는 그림 11과 표 4에 정리되어 있다. 표 4에서 쌍곡선법과 비교했을 때 제안된 방법은 최종침하량( $S'_f/S_f$ ) 및 전체 침하거동



(RMSE)에 대한 정확도에서 우수한 침하 예측결과를 보여준다.

표 4. 예측조건 및 예측 결과 (실험 2, 변곡점 이후)

구분	계측최종침하량, $S_f$ (mm)	예측최종침하량, $S'_f$ (mm)	$S'_f/S_f$	RMSE (mm)
초기 15% 자료 이용 (성토완료후 4%)	24.30	20.65	0.85	2.74
쌍곡선법 (성토완료후 4%)	24.30	17.15	0.71	5.36
초기 22% 자료 이용 (성토완료후 11%)	24.30	23.01	0.95	1.16
쌍곡선법 (성토완료후 11%)	24.30	22.89	0.94	1.25



(a) 초기 15%, 성토완료후 4% 자료를 이용

(b) 초기 22%, 성토완료후 11% 자료를 이용

그림 11. 예측 결과 및 쌍곡선법과의 비교 (실험 2, 변곡점 이후)

## 5. 결론

본 연구에서는 점증하중이 재하되는 지반에 대하여 하중 재하과정의 계측자료를 이용할 수 있으며, 재하 초기의 매우 적은 침하계측 자료만을 이용하여 정확하고 신뢰성 있는 예측이 가능한 계측기반 침하 예측 기법을 제안하였으며, 나아가 변곡점 이후의 침하 데이터가 추가될수록 지속적으로 침하거동 예측의 정확도를 높일 수 있는 방법을 제안하였다. 또한 실험조건이 잘 제어된 이상적인 1차원 점증 재하 조건에서 대형 압밀시험을 실시하고, 그 계측결과를 기반으로 침하거동 예측을 수행하여 제안된 방법의 적용성을 검증하였다.

(1) 점증하중이 재하되는 지반의 침하거동은 성토완료 시점 이전에 나타나는 변곡점을 기준으로 두 개의 곡선으로 구분할 수 있으며, 각각의 곡선은 축변환을 통하여 선형회귀시킬 수 있다. 이 때 변곡점 이전과 이후의 침하거동은 각각 성토 시간과 연약층 두께에 대하여 정규화된 식 (2) 및 식 (3)으로 표현된다.

(2) 변곡점 이전의 계측자료를 이용하여 변곡점 이후의 침하거동까지 예측하기 위해서는 변곡점 전, 후 침하곡선의 상관관계를 결정해야 하며, 이는 각 곡선에 대한 선형회귀 직선의 기울기 및 절편인  $\alpha$ 와  $\alpha'$ ,  $\beta$ 의 상관관계로 결정된다. 연약층의 두께와 성토하중, 배수거리등을 고려한 상관관계는 식 (5), 식 (6)과 같다.

(3) 점증 재하 조건에서 실시한 대형압밀시험에 대한 변곡점 이전의 침하 데이터를 이용한 침하거동 예

측 수행 결과, 최종침하량 예측에 대한 정확도 및 전체 예측자료에 대한 RMSE(Root mean square error)를 바탕으로 보았을 때, 총 침하량 25.6, 24.3 mm에 대한 오차율이 10% 이내이고 RMSE도 2.07 mm 이내로서 제안된 점증재하지반에 대한 계측기반 침하거동 예측방법은 그 오차가 적으며 침하 거동을 잘 예측하는 것으로 나타났다.

(4) 쌍곡선 법을 근간으로 변곡점 이후의 계측자료를 이용하여 예측 정확도를 지속적으로 향상시킬 수 있는 침하예측 보완 기법을 제안하였다. 제안된 방법은 기존의 예측방법(쌍곡선법)과 비교하여 최종 침하량 및 전체 침하거동에 있어서 더욱 정확한 예측결과를 보여주어 제안된 방법의 적용성 및 우수성을 검증할 수 있었다.

## 참고문헌

1. 윤찬영, 이상인, 백승경, 정충기 (2007), 점증하중 재하 지반의 계측기반 침하 예측 방법의 개발, **대한 토목학회 논문집 제 27권, 제 6C호**, pp. 425-432
2. 윤찬영, 조경진, 정충기 (2007), 연약지반 압밀해석을 위한 다층지반 및 스미어 경계 영역에서의 수치 해석 기법 개발, **지반공학회 봄학술발표회**, pp. 406-413
3. 조성민, (1998), 국내 연약점성토 지반의 성토 재하시 변형 특성 분석, **서울대학교 박사학위논문**, pp. 74-77
4. Carrillo, N. (1942), Simple two and three dimensional cases in the theory of consolidation of soils, *Journal of Mathematics and Physics*, Vol. 21, pp. 1-5
5. Tang, X. W. and Onitsuka, K. (2000). Consolidation by vertical drains under time-dependent loading, *International Journal for Numerical and Analytical Method in Geomechanics*, vol. 24, pp. 739-751