

## 비선형 유한변형률 압밀이론을 이용한 압밀 해석 프로그램 개발 Development of a Program for Consolidation Analysis Using Nonlinear Finite Strain Consolidation Theory

이 송<sup>1)</sup>, Song Lee, 이규환<sup>2)</sup>, Kyu-Hwan Lee, 전제성<sup>3)</sup>, Je-Sung Jeon

- 1) 서울시립대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, University of Seoul.
- 2) 서울시립대학교 도시과학연구소 선임연구원, Senior Researcher, U.S.I., University of Seoul.
- 3) 서울시립대학교 토목공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, University of Seoul.

**SYNOPSIS :** *Terzaghi's* theory of one-dimensional consolidation is restricted in its applicability to relatively thin layers and small incremental loading. Because it is assumed to infinitesimal strain and linear material function. For this reason, *Gibson et al* established a rigorous formulation for the one-dimensional nonlinear finite strain consolidation theory. There are some difficulties in the application of finite strain consolidation theory. The developed program consisted of several forms and modules. These forms and modules with graphic-user-interfaced format are used in analysis of consolidation practices. For the purpose of verification of developed program, the results of case study and prediction of developed program are compared. The results of comparison is fairly well with prediction and measured data. And with varying finite strain consolidation parameter,  $g(e)$  or  $\lambda(e)$ , the sensitivity of predicted values were examined.

**Key Words :** finite strain consolidation, nonlinear,  $g(e)$ ,  $\lambda(e)$ , sensitivity, program

### 1. 서론

1967년도 *Gibson, England, Hussey* 등에 의해 처음으로 발표된 유한변형률 압밀이론은 응력-변형, 변형-투수계수등의 관계를 선형으로 가정한 고전압밀론의 많은 한계를 극복하고 실제 압밀현상에 근접한 예측을 수행하기 위해 국내외의 많은 연구문헌에 인용되었다. 그러나 이 이론을 현상에 손쉽게 적용하기 위해서는 각각의 비선형 함수 및 비선형 계수를 구하기 위한 정밀한 실내시험이 요구되는 것이 사실이다. 본 연구에서는 기존의 표준압밀시험결과를 이용하여 유한변형률 압밀이론의 적용에 필요한 각종 함수식과 비선형 계수등을 구할수 있는 과정 및 다양한 현장초기상태에 맞는 초기조건 산정과정을 포함하고 이를 손쉽게 압밀현상 예측에 이용할 수 있는 해석프로그램을 개발하였다. 또한 실내시험과 국내외의 현장사례를 이용하여 개발된 프로그램의 검증을 실시하였다. 실내시험으로는 Rowe cell 을 이용한 압밀시험 및 투수시험, 표준압밀시험등을 수행하였으며, 국외의 현장 사례는 *Mikasa* 에 의한

오사카 해안지역의 압밀침하사례와 국내 OO 지역의 연약지반 개량사례를 이용하였다.

## 2. 비선형 유한변형을 압밀이론

### 2.1 좌표계 및 비선형 함수

압밀경과시간에 관계없이 토층두께가 일정하다고 가정하는 미소변형을 압밀이론과는 달리 시간별 침하로 인해 경계조건이 변화하는 현상을 표현하기 위해 본 이론에서는 오일리 언좌표계가 아닌 물질좌표계를 도입하였는데, 물질좌표계에서의  $z$ 는 기준면과 해석지점사이 에 존재하는 단위면적당의 흡입자 체적으로 정의되며 수식으로 나타내면 식 2.1 과 같다.

$$Z(a) = \int_0^a [1 - n(a,0)] da \quad (\text{식 2.1})$$

한편 지배방정식상에서 나오는 비선형 함수  $g(e)$ 와  $\lambda(e)$ 는 식 2.2 와 같다.

$$g(e) = -\frac{k(e)}{\gamma_w} \cdot \frac{1}{1+e} \cdot \frac{d\sigma'}{de}, \quad \lambda(e) = -\frac{d}{de} \left( \frac{de}{d\sigma'} \right) \quad (\text{식 2.2})$$

여기서  $n$  과  $e$  는 각각 간극률과 간극비를 나타낸다.

### 2.2 지배방정식

1981년 Gibson, Schiffman, Cargill 의해 발표된 유한변형을 압밀지배방정식은 식 2.3 과 같은데, 여기서는 응력-변형, 변형-투수계수의 비선형적 관계와 토층의 자중이 고려되었다.

$$\left( \frac{\gamma_s}{\gamma_w} - 1 \right) \frac{d}{de} \left[ \frac{k(e)}{1+e} \right] \cdot \frac{\partial e}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial e} \left[ \frac{k(e)}{\gamma_w(1+e)} \cdot \frac{d\sigma'}{de} \cdot \frac{\partial e}{\partial z} \right] + \frac{\partial e}{\partial t} = 0 \quad (\text{식 2.3})$$

다양한 유효응력단계에서 식 2.4 가 만족된다면 식 2.3 에  $g(e)$ 와  $\lambda(e)$ 를 적용시킨 최종 지배 방정식은 식 2.5 와 같다.

$$\frac{d}{de} \cdot [ g(e) ] \cdot \left( \frac{de}{d\sigma'} \right) = 0 \quad (\text{식 2.4})$$

$$(\gamma_s - \gamma_w) \cdot \lambda(e) \cdot \frac{\partial e}{\partial z} + \frac{\partial^2 e}{\partial z^2} = \frac{1}{g(e)} \cdot \frac{\partial e}{\partial t} \quad (\text{식 2.5})$$

## 3. 수치해석

유한변형을 압밀이론을 이용한 압밀침하현상의 예측에 필요한 수치해석은 유한차분해석 범중 Implicit 방법에 해당하는 Crank-Nicolson 방법을 사용하였다.

### 3.1 차분방정식

식 2.5를 Crank-Nicolson 방법에 의해 차분식형태로 표현하면 식 3.1과 같은데, 이 식은 시간단계에 따른 각 절점별 간극비로 표현되어 있다.

$$(\beta - 1)e_{i-1}^{n+1} + (\alpha + 2)e_i^{n+1} - (\beta + 1)e_{i+1}^{n+1} = (1 - \beta)e_{i-1}^n + (\alpha - 2)e_i^n + (\beta + 1)e_{i+1}^n \quad (\text{식 3.1})$$

$$\text{여기서, } \alpha = \frac{2(\Delta z)^2}{g(e) \cdot \Delta t}, \quad \beta = \frac{1}{2}(\Delta z)\lambda(e)(\gamma_s - \gamma_w) \quad (\text{식 3.2})$$

### 3.2 g(e) 및 λ(e)

유효응력에 대한 간극비 관계를 식 3.3과 같이 나타내고 간극비와 투수계수의 관계를 식 3.4와 같이 나타낸 후 g(e)와 λ(e)에 대한 함수식을 유도하면 식 3.5 및 식 3.6과 같다.

$$e = A \cdot \sigma'^{-B} \quad \text{또는} \quad e = A \cdot \ln \sigma' + B \quad (\text{식 3.3})$$

$$k(e) = C \cdot \text{Exp}(D \cdot e) \quad \text{또는} \quad k(e) = C \cdot e + D \quad (\text{식 3.4})$$

$$g(e) = \frac{C \cdot \text{Exp}(D \cdot e)}{\gamma_w} \cdot \frac{1}{1+e} \cdot [A^{\text{coef}2} \cdot (\text{coef}2) \cdot e^{-\text{coef}2-1}] \quad (\text{식 3.5})$$

$$\lambda(e) = (\text{coef}1)^{\text{coef}2} \cdot (1+B) \cdot e^{\text{coef}2} \quad (\text{식 3.6})$$

### 3.3 초기 및 경계조건

압밀침하가 진행되기 전상태인 원지반의 초기상태는 식 3.7과 같은 깊이별 토층의 자중항과 식 3.8과 같은 초기하중항으로 표현된다.

$$\sigma'(z) = (\gamma_s - \gamma_w)z + q_0'(z) \quad (\text{식 3.7})$$

$$q_0'(z) = (\text{co}q_01) \cdot z + (\text{co}q_02) \quad (\text{식 3.8})$$

식 3.7로 표현되는 각 깊이별 유효응력은 응력-변형간의 함수식을 통해 간극비로 변환되며 이론적인 초기 간극비 분포형태와 실제 현장의 초기 간극비 분포형태를 보정하는데  $q_0'(z)$ 가 이용된다. 현장의 배수조건을 타나내는 경계조건은 양면배수와 일면배수형태로 표현되는데, 양면배수의 경우는 배수경계면에서 고정된 간극비로 나타낼수 있으며, 일면배수의 경우는

간극수의 유출속도  $v_w$ 와 토립자의 유출속도  $v_s$ 가 같다고 하여 3.9와 같이 나타내어 진다.

$$\frac{\partial e}{\partial z} + (\gamma_s - \gamma_w) \frac{de}{d\sigma'} = 0 \quad (\text{식 3.9})$$

### 3.4 매트릭스·구성

배수조건에 따른 시간별 각각 절점에서의 간극비를 계산하는 매트릭스는 식 3.10 및 3.11과 같다. 식 3.11에서의 매트릭스형태는 양면배수의 경계조건에 대한 것이다.

$$[A \text{ Matrix}][e_i^{n+1}] = [B \text{ Matrix}][e_i^n] + [C \text{ Matrix}] \quad (\text{식 3.10})$$

$$\begin{array}{c}
 \text{A Matrix} \\
 \left[ \begin{array}{cccc}
 (\alpha+2) & -(\beta+1) & & \\
 (\beta-1) & (\alpha+2) & & \\
 & & 0 & \\
 & & & 0 \\
 & & & & (\beta-1) & (\alpha+2) & -(\beta+1) \\
 & & & & (\beta-1) & (\alpha+2) & \\
 \end{array} \right] \begin{bmatrix} e_2^{n+1} \\ e_3^{n+1} \\ \vdots \\ e_{j-2}^{n+1} \\ e_{j-1}^{n+1} \end{bmatrix} =
 \end{array}$$
  

$$\begin{array}{cc}
 \text{B Matrix} & \text{C Matrix} \\
 \left[ \begin{array}{cccc}
 (\alpha-2) & (\beta+1) & & \\
 (1-\beta) & (\alpha-2) & (\beta+1) & \\
 & & 0 & \\
 & & & 0 \\
 & & & & (1-\beta) & (\alpha-2) & (\beta+1) \\
 & & & & (1-\beta) & (\alpha-2) & \\
 \end{array} \right] \begin{bmatrix} e_2^n \\ e_3^n \\ \vdots \\ e_{j-2}^n \\ e_{j-1}^n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 2(1-\beta)e_1^n \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \\ 2(1+\beta)e_j^n \end{bmatrix} \quad (\text{식 3.11})
 \end{array}$$

## 4. 1DFinite Program

본 프로그램은 Windows98 운영체제에 맞도록 설계된 프로그램으로서, GUI의 극대화를 기대할 수 있는 Visual Tool Programming 중 Delphi Programming Language를 이용하여 개발되었다. Dynamic array의 사용으로 인해 해석하고자하는 절점수의 제한이 없으며, 사용할려는 폼 및 모듈을 자동으로 생성, 분해하도록 설계하여 계산시간을 최대한 단축하도록 하였다. 개발된 프로그램의 구성 및 이용, 사용자 Interface 등을 살펴보면 다음과 같다. 1DFinite 프로그램은 총 4개의 기본 폼으로 구성되어 있으며, 각 폼은 입력 및 실행을 위한 과정으로 이루어져 있다. 이들 각각에 대한 내용은 다음과 같다.

#### 4.1 STAGE 1

1 단계는 기본적으로 해석대상 지반의 초기상태 및 이를 이용한 좌표변환 과정이다. 그림 4.1 에서 보듯이, 이 과정에서는 지반의 자중을 제외한 깊이별 초기상재하중  $q_0'(z)$  의 고려 유·무와 깊이별 초기 간극비 분포의 입력 및 이들의 회귀분석 유·무와 결과, 좌표변환 결과, 사용하는 단위계의 선정, 최종 결과들의 그래픽처리 등으로 이루어져 있다.

#### 4.2 STAGE 2

2 단계는 기본적으로 비선형 계수인  $g(e)$ 와  $\lambda(e)$ 를 결정하는 단계로서, 그림 4.2 에서 보듯이 응력-변형 관계나 변형-투수계수 관계를 이용하여 각 유효응력상태별  $g(e)$ 와  $\lambda(e)$ 를 그래픽 처리하고, 원하는 응력단계에 맞는 비선형 계수를 선택할 수 있는 과정이다. 응력-변형 관계에 있어서는 유효응력과 간극비의 관계를 누송형태 및 로그함수 형태로 표현할 수 있는 상수를 입력시켜줄 수 있으며, 변형-투수계수 관계는 지수함수 및 선형함수 형태로 표현할 수 있는 상수를 입력시킬 수 있도록 하였다. 또한 이러한 상수들의 직접적인 입력 이외에, 표준압밀시험에서 얻은 결과를 입력하여 간접적으로  $g(e)$ 와  $\lambda(e)$ 를 산정할 수도 있도록 하였다. 한편 단계하중재하를 고려할 수 있는 본 프로그램에서는 압밀이 진행됨에 따라 변화하는 지반내의 유효응력의 상태에 따라 각기 상이한 비선형 계수를 적용시켜 해석할 수 있다.

#### 4.3 STAGE 3

3 단계는 그림 4.3 에서 보듯이 기본적으로 해석에 필요한 경계조건 및 초기응력조건, 하중재하조건, 해석 절점수, 시간간격, 각 해석단계별 Matrix 구성성분인  $\alpha$ ,  $\beta$ 의 확인등과 이들의 결과를 그래픽 처리하는 과정으로 이루어져 있다. 특히 본 단계는 지반의 자중으로 인한 초기상재하중을 확인할 수 있으며, 깊이별 초기상재하중  $q_0'(z)$ 을 구하는데 있어서 그래픽적으로 유추할 수 있는 과정이 포함되어 있다.

#### 4.4 STAGE 4

4 단계는 그림 4.4 에서 보듯이 각 단계별 입력치를 기본으로 한 최종 해석결과를 나타내는 과정으로서, 각 시간단계와 해석절점별로 그 해석결과가 간극비 및 과잉간극수압의 형태로 그리드상에 나타나며, 이들 결과치를 기본으로 한 시간-침하곡선 및 시간-과잉간극수압 곡선이 나타난다.

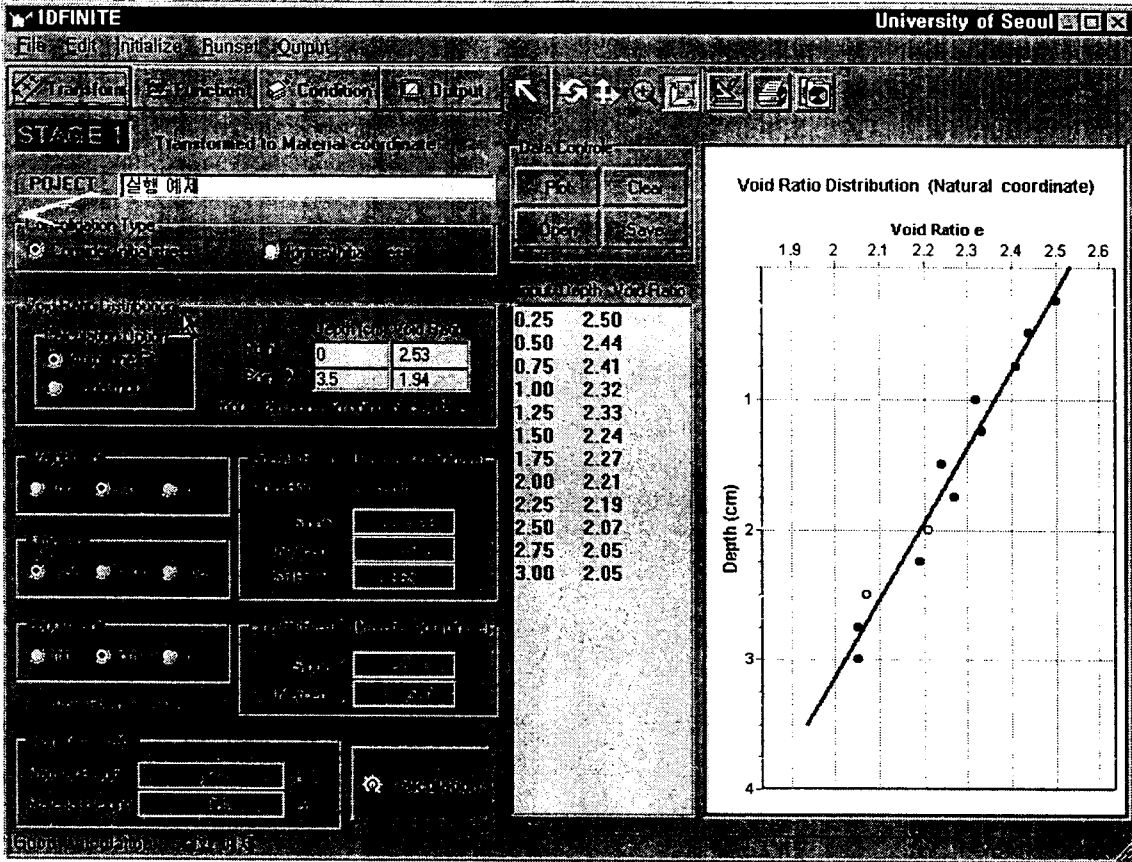


그림 4.1 IDFinite Program 의 STAGE1 화면

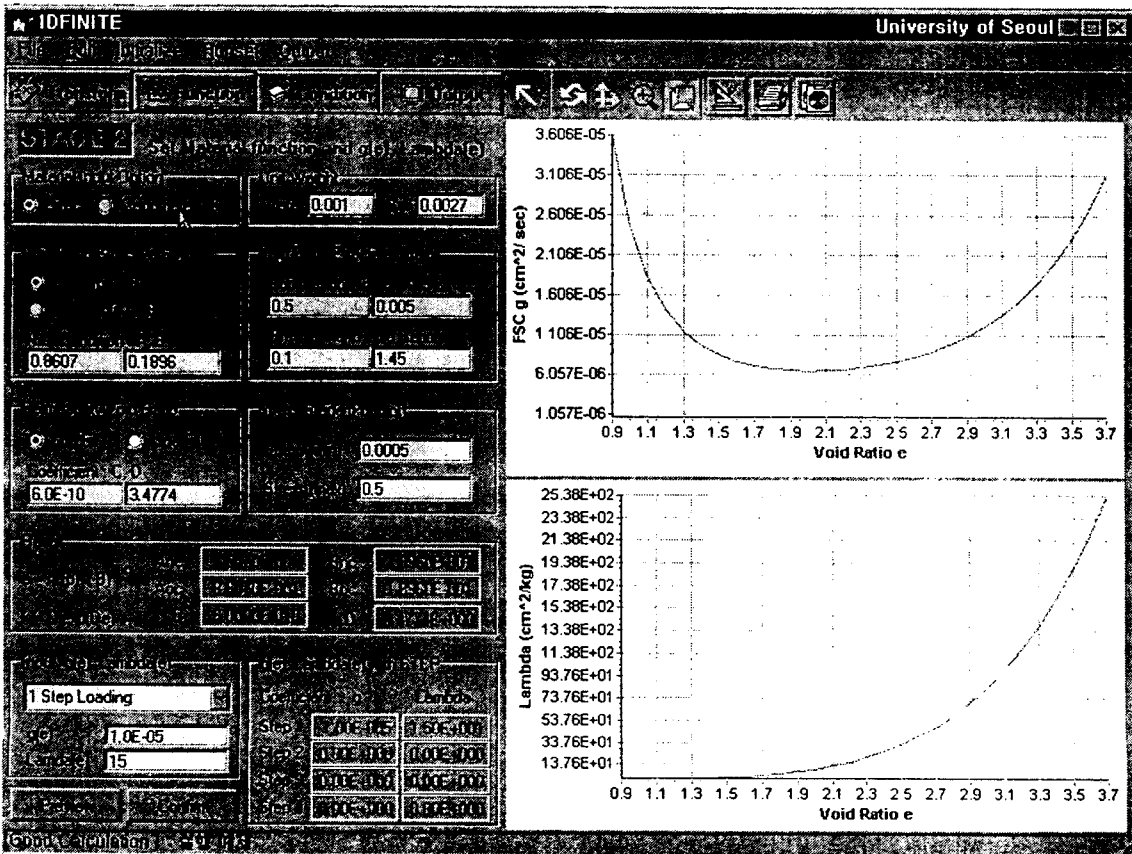


그림 4.2 IDFinite Program 의 STAGE2 화면

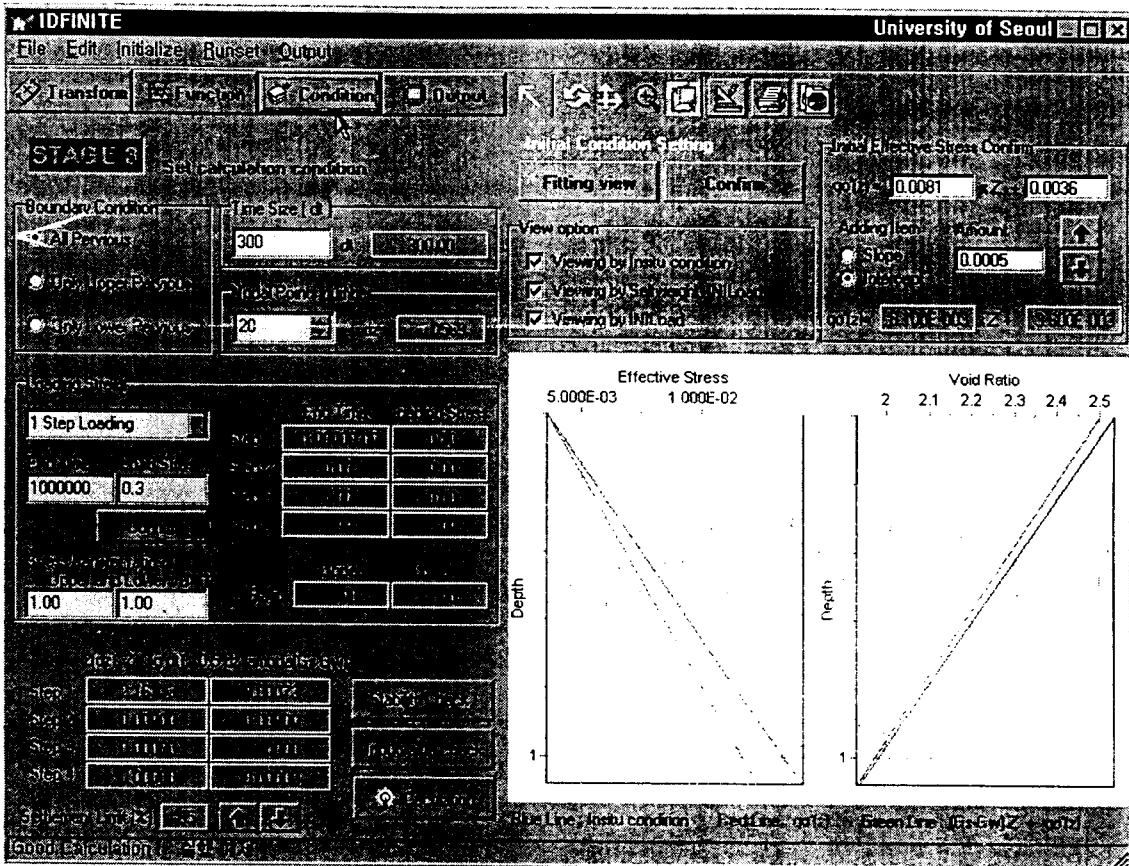


그림 4.3 IDFinite Program 의 STAGE3 화면

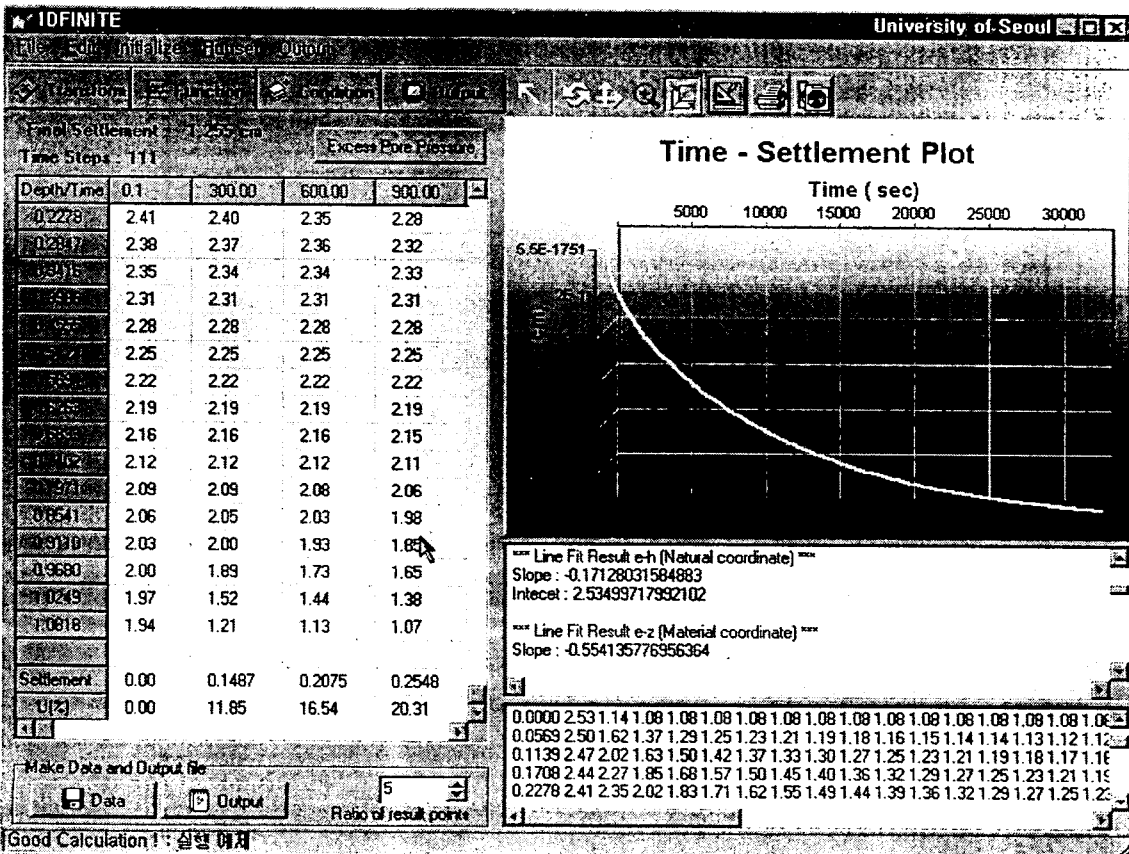


그림 4.4 IDFinite Program 의 STAGE4 화면

## 5. 실내시험에 의한 압밀변수 산정 및 Program 의 검증

유한변형을 압밀이론에서 필요한 응력-변형관계 및 변형-투수계수의 관계를 구하고 이들 관계를 표현할 수 있는 적정 수식을 찾기 위한 실내시험으로서 Rowe cell 압밀시험 및 투수 시험, 표준압밀시험을 실시하였다. Rowe cell 압밀시험에 의한 응력-변형관계는 재성형한 시료를 압밀셀에 투기한 후, 약 5kPa 의 압으로 압밀시켰다. 그 후 유효압을 10, 20, 40, 80, 160, 250, 350, 450, 650kPa 로 변화시켜가며 압밀시험을 하였고 각각의 유효응력상태마다 간극비를 계산하여 유효응력-간극비간의 관계를 구했다. 각 유효응력 단계별로 압밀이 종료된 시점에서 투수시험을 실시하였으며, 초기상태가 상이한 시료에 대해 반복적인 실험을 실시하여 구한 본 시료의 유효응력-간극비 관계와 간극비-투수계수의 관계는 그림 5.1, 그림 5.2 와 같다. Rowe cell 시험과 병행하여 실시한 표준압밀시험결과 Cc 값은 대략 0.35 로 타나났다.

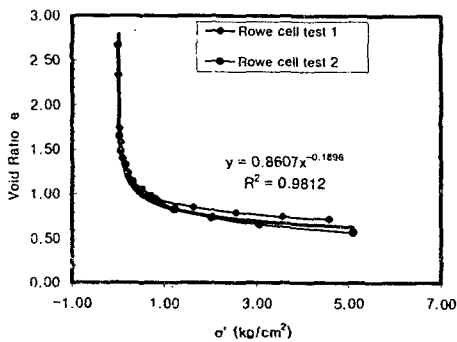


그림 5.1 유효응력-간극비 관계

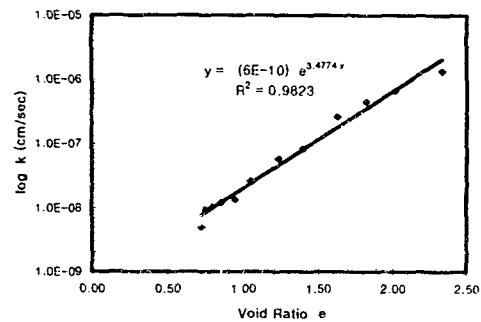


그림 5.2 간극비-투수계수 관계

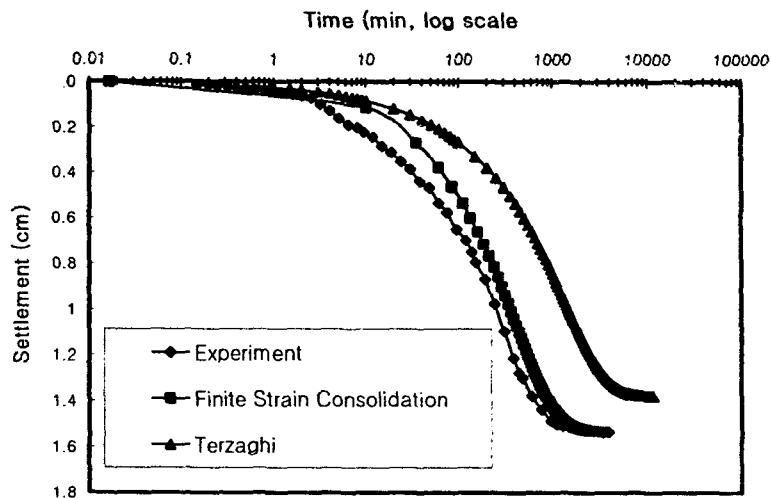


그림 5.3 시험결과 및 해석결과



Rowe cell 압밀시험에 의한 실제 압밀과정을 IDFinite Program 으로 예측한 결과 및 고전압 밀론으로 예측한 결과와 함께 비교한 결과는 그림 5.3 과 같다. IDFinite Program 에 의한 예측은 Rowe cell 시험에서 구한 응력-변형, 변형-투수계수관계를 근거로 하였다. 결과에서 보듯이 실제 압밀침하현상과 비교해 볼 때, 고전압밀론에 의한 예측은 침하량보다 침하시간에 있어서 상당히 차이가 나는 것을 볼 수 있는데, IDFinite Program 에 의한 예측결과가 고전압밀론에 의한 예측결과보다 더욱 빠른 압밀도의 진행을 나타내고 있는데, 이는 여러 문헌상에서의 경우와 일치하는 현상이다.

## 6. OO 지역 연약지반 침하계측에 대한 사례분석

IDFinite Program 을 이용하여 OO 지역 연약지반 처리구간중 프리로딩에 의한 처리가 이루어지고 있는 지역의 압밀침하 예측을 실시하였다. 이 지역은 상부 5.3m 정도가 해성퇴적층으로서 암회색의 실트질 점토로 이루어진 매우 연약한 층이다. 1997년 10월 23일 0.9m를 성토한 후 25일 경과후에 1.28m를 성토했으며 그후 38일이 경과된 시점에서 1.71m, 성토 시작후 157일 후 2.1m를 성토하였다. 성토시점부터 현재까지 침하계측이 이루어지고 있으며, 앞으로도 몇차례의 추가성토가 계획되어 있다.

IDFinite Program 에 의한 예측지와 현재까지의 계측결과를 비교·분석하여 IDFinite Program 의 신뢰성을 검증하였다. 해석에 필요한 각종 함수식들은 기존의 설계보고서 및 표준압밀시험과 토성시험자료를 근거로 추정하였다. 표준압밀시험에 의한 초기간극비는 1.1~0.8 까지 나타났으며 비중 2.70, 초기함수비 38.1%,  $c_c$  값이 0.32,  $c_v$  값이  $1.08E-03 \text{ cm}^2/\text{sec}$  로 나타났다.

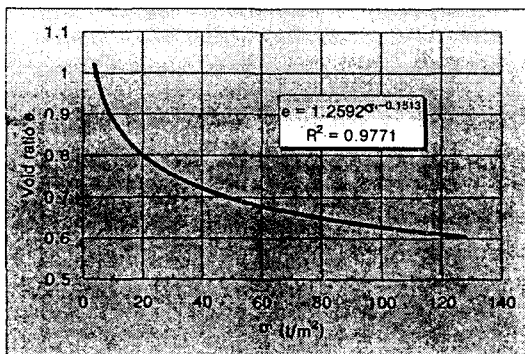


그림 6.1 유효응력-간극비 관계

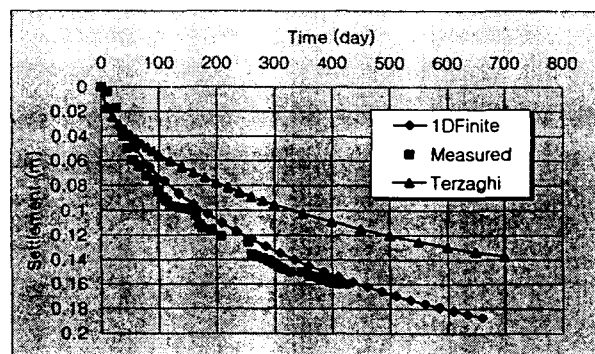


그림 6.2 시간-침하곡선

그림 6.1의 유효응력-간극비 관계는 표준압밀시험에서 얻은 결과를 이용하여 누승형태의 회귀분석을 통해서 구했다. 한편 투수계수는 지반의 두께 및 초기간극비가 상당히 작으므로 일정한 값을 적용시켰다. 그림 6.2에서는 IDFinite Program 에 의한 예측지와 현재까지의 계측결과, 테르자기의 1차원 압밀론을 이용한 예측치를 함께 비교하였다. 미소변형이론인 테르자기의 1차원압밀이론에 의한 예측은 침하량 및 침하시간에 있어서 실측치와 상당히 차이가 나는 것으로 나타나고 있다. 즉 응력과 변형간의 관계를 상수로 가정하며, 토층의 자중

을 무시하는 경우 실제의 시간과 침하량을 예측하는 데는 많은 무리가 있다.

## 7. Osaka 해안점토에 대한 사례분석

1981년 Gibson 등은 Mikasa 가 발표한 오사카 해안점토의 압밀특성을 이용하여 유한변형을 압밀이론에 의한 압밀침하해석을 실시하였다. 여기서는 IDFinite Program 을 이용하여 동일 조건에 대한 압밀침하예측을 하였다. 그림에서 보듯이 IDFinite Program 에 의한 해석결과와 논문상의 결과는 잘 일치하는 반면, 테르자기의 1차원 압밀이론에 의한 예측치와는 상당한 차이를 보임을 알 수 있다.

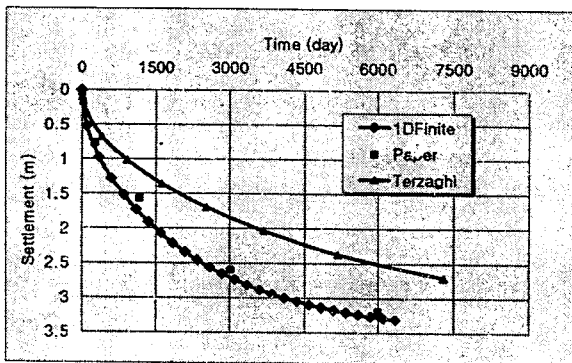


그림 7.1 시간-침하곡선

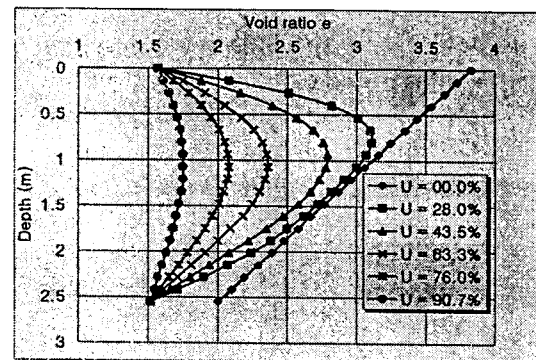


그림 7.2 압밀도에 따른 깊이별 간극비 분포

## 8. 비선형계수의 영향분석

1981년 Gibson 등은 비선형계수인  $g, \lambda$  등을 상수로 하여 해석하되, 이러한 비선형계수들의 변화를 고려하지 못한 한계점에 관하여 언급하였다. 특히 지반에 가해지는 유효응력의 크기가 지반의 초기조건에 비해 상대적으로 클 때, 이러한 비선형 계수를 상수로 하여 해석한 결과는 실제현상과 많은 차이가 발생할 수 있다. 여기서는 7 장에의 해석사례를 기준으로 하여  $g, \lambda$ 의 변화가 압밀침하시간에 미치는 영향을 분석하였다.

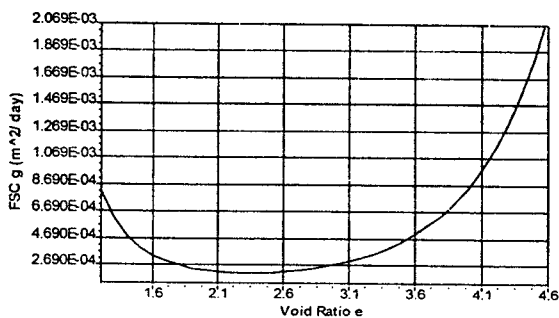


그림 8.1 간극비 단계별 g 값의 변화

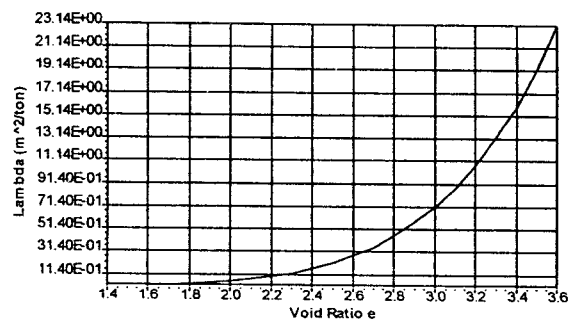


그림 8.2 간극비 단계별  $\lambda$  값의 변화

그림 8.1 과 8.2 에서 보듯이 간극비단계, 즉 각각의 유효응력 단계별 비선형계수들의 값은 특정한 응력단계 구간에서는 거의 일정한 경향을 보이거나 이 일정 단계를 벗어나서는 큰 폭으로 변화하는 것을 알 수 있다. 이것은 압밀대상 지반의 초기상태와 압밀종료후의 지반상태가 큰 폭으로 변화하는 경우, 고정된 값의 비선형 계수들을 적용하여 압밀해석하는데 있어서의 문제점을 말해준다고 할 수 있다.

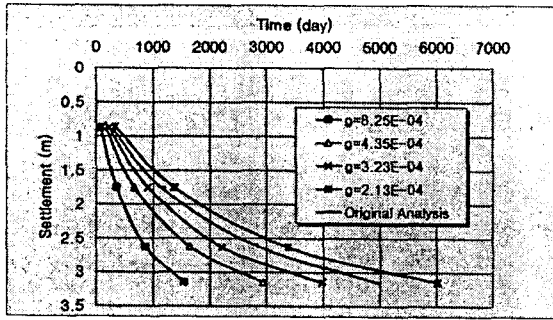


그림 8.3  $g$  값의 변화에 따른 시간-침하곡선

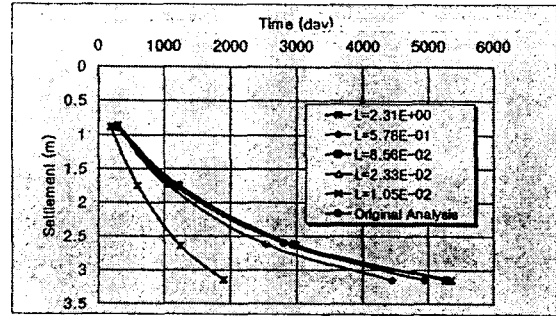


그림 8.4  $\lambda$  값의 변화에 따른 시간-침하곡선

## 9. 결론

본 연구에서는 유한변형률 압밀이론의 적용에 필요한 각종 함수식과 비선형 계수등을 구할수 있는 과정 및 다양한 현장초기상태에 맞는 초기조건 산정과정을 포함하고 이를 손쉽게 압밀현상 예측에 이용할 수 있는 해석프로그램을 개발하였다. 또한 국내외의 사례를 이용하여 개발된 프로그램을 검증하였고, 개발된 프로그램을 통한 비선형 유한변형률 압밀이론의 적용에 관한 연구를 수행하였는데, 이를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 비선형 유한변형률 압밀이론을 이용하여 압밀-침하해석용 프로그램인 IDFinite 를 개발하였으며, IDFinite 를 통해서 응력-변형, 변형-시간등의 비선형적 관계를 고려한 압밀해석 및 유효응력 단계별로 적정 비선형 계수를 적용한 압밀해석과 다양한 초기조건 또는 단계별 하중재하를 고려한 비선형 압밀해석을 할 수 있다.
- 2) 유한변형률 압밀이론의 적용에 가장 큰 어려움으로 작용했던 비선형 계수들의 결정과 단계별 적정값의 적용사항들에 있어, 기존의 표준압밀시험결과를 쉽게 적용시키는 방법을 개발하였다.
- 3) 비선형 계수들을 고정된 상수로 적용하는데 있어서의 제반 문제점을 도출하였다. 즉, 대상지반에 작용하는 유효응력의 범위 또는 변형의 범위가 큰 경우에는 단일한 상수값을 통한 비선형 압밀해석에 문제점이 있으며, 적절한 비선형 계수값은 고려하고자 하는 유효응력범위에 기준하여 결정되어야 한다.

## 10. 참고문헌

1. 이 송, 전제성, 김성택, 1998, “Rowe cell 시험을 이용한 고함수비 지반의 비선형 압밀변수 산정에 관한 연구”, 대한토목학회 학술발표회 논문집, pp. 109-112
2. 全濟晟, 1997, “眞空壓密工法이 適用된 海性粘土地盤의 舉動分析,” 서울시立大學校 碩士學位 論文, pp. 8-60
3. Cargill, K. W., 1984, “Prediction of Consolidation of Very Soft Soil”, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 110, No. 6, pp. 775-795
4. Gibson, R. E., England, G. L., and Hussey, J. L., “The Theory of One-dimensional Consolidation of Saturated Clays – I. Finite Non-Linear Consolidation of Thin Homogeneous Layers”, Geotechnique, Vol. 17 (1967), pp. 261-273
5. Gibson, R. E., Schiffman, R. L. and Cargill K. W., 1981, “The Theory of One-dimensional Consolidation of Saturated Clays – II. Finite Nonlinear Consolidation of Thick Homogeneous Layers”, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 18 , pp. 280-293
6. Pane, V. and Schiffman, R. L., “A Comparison between Two Theories of Finite Strain Consolidation”, Soils and Foundations, Vol. 21, No. 4 (1981), pp. 81-84
7. Rowe, P. E. and Barden, L., 1966, “A New Consolidation Cell”, Geotechnique, Vol. 16, No. 2, pp. 162-170