

지하수 흐름을 고려한 지하구조계의 탄소성해석에 대한 전-후처리기법의 개발

Development of Pre-Postprocessing Toolbox

for Elasto-plastic Analysis of Underground Structures with Water Flow

김 문겸* 임 성철** 이 재영*** 송 재성****
Kim, Moon-Kyum Lim, Sung-Chull Lee, Jae-Yung Song, Jae-Sung

ABSTRACT

In this study, pre-postprocessing toolbox is developed to perform elasto-plastic analyze of underground structures with transient ground water flow. This toolbox is composed of three modules. The first is the data input processor for the structural analysis. The preprocessing is using GUI (Graphic User Interface), which is consist of dialog box, pull down, and short-cut icon, etc. The second is the structural analysis module. The analysis is based on the elasto-plastic finite element method involving additional options such as ground excavation effect, transient ground water flow, and rock bolts behavior. The last is the postprocessing module. The postprocessing is able to verify the result of the structural analysis by the graphical simulation which visualizes the element mesh, the node displacements, the element stress states, the stress contour, the ground water surface, and the rock bolt stresses. Since various options are considered separately in this toolbox, it is easy to modify the module of each processing, and to update other functional modules for the given analysis conditions.

1. 서론

지하구조계의 거동을 예측하기 위한 범용 구조해석프로그램은 현재 다양한 목적과 형태로 사용되고 있다. 특히, 지하수 천이흐름을 고려한 구조해석프로그램은 몇가지 종류에 국한되고 있는 실정이다. 또한, 이들 대부분의 프로그램들은 DOS 운영체제하에서 실행되는 프로그램으로서 구조해석에 전문적인 지식을 가지고 있지 않은 사용자에게는 자료의 입력과 해석 및 결과분석을 용이하게 수행할 수 없다. 컴퓨터 산업이 발달해 나감에 따라 사용자가 좀더 친숙하게 접근할 수 있는 운영체제가 등장하게 되었고, 현재 개인용 PC에서 사용되고 있는 운영체제는 윈도우이다. 이러한 시대적 상황에 맞추어 그래픽 사용자 인터페이스(Graphic User Interface)를 이용하여 윈도우 운영체제하에서 신뢰성있고 원활이 돌아갈 수 있는 32비트코드로 짜여진 구조해석프로그램의 필요성이 대두되었다. 따라서 구조해석에 필요한 기본적인 데이터의 입력작업을 가시적으로

* 연세대학교 공과대학 사회환경시스템공학부 토목전공 교수
** 두산엔지니어링 전문
*** 연세대학교 공과대학 사회환경시스템공학부 토목전공 박사과정
**** 연세대학교 공과대학 사회환경시스템공학부 토목전공 석사과정

손쉽게 할 수 있도록 하는 전처리작업과 구조해석을 통하여 계산된 결과의 검토를 위한 후처리작업을 통합하여 일괄적인 작업을 수행할 수 있도록 모든 작업의 통합화를 구현한 FAUSS(Finite element Analysis for Underground Structural System)를 개발하게 되었다.

FAUSS는 대부분의 다른 윈도우용 응용프로그램들이 가지는 그래픽통합환경, 다중처리, 대화식 전처리, 후처리기능 등의 특징을 가진다. 메뉴, 대화상자, 단축아이콘 등의 GUI를 통하여 자료의 입력이 용이해졌으며, 후처리기능을 통한 데이터 입력오류의 발견이 쉬워졌다. 그리고 단순한 수치의 나열보다 그래픽을 통한 다양한 후처리로 인해 해석결과에 대해 전반적인 경향을 파악하는데 큰 도움이 된다.

굴착에 따른 지하수 천이흐름의 해석결과로 나타나는 후처리기능에서의 침윤선이 부드러운 곡선이 아닌 요소망의 형태를 따라 불연속적으로 나타나는 문제점을 해결하고, 본 프로그램에서 사용된 등응력선도의 표현기법을 응용하여 유선망을 작도할 수 있도록 하게 되면 지하수의 영향을 고려한 유한요소해석프로그램으로서 뛰어난 기능을 가진 프로그램으로 발전할 수 있을 것이다.

2. 객체지향프로그래밍

2.1 FAUSS의 자료의 흐름과 관계

그림 1은 입력 및 전처리 모듈, 구조해석 모듈, 후처리 모듈의 상관관계와 각 모듈 클래스간의 자료흐름과 관계를 나타낸 개념도이다.

전처리 모듈은 파일 입출력 클래스와 대화상자 클래스로 구성되며, 대화상자 클래스는 MS Visual C++에서 제공하는 도구를 사용하여 구현하였다. 구조해석 모듈은 유한요소해석에서 필요한 Node 클래스, Element 클래스, Matrix 클래스, FEM Solver 클래스, 물성 클래스 등과 지하수 흐름을 고려하는데 필요한 흐름의 경계조건 클래스와 굴착정보 클래스들로 구성되어 있다. 후처리 모듈은 Visual C++에서 제공하는 MFC(Microsoft Foundation Class)^[1] 중 그래픽 라이브러리 클래스를 주로 사용하였고 자료출력 클래스와 후처리 선택사항을 정하는 대화상자 클래스로 구성되어 있다.

2.2 대화상자 클래스

FAUSS에서 전처리와 후처리에 사용되는 대화상자 클래스는 MFC의 CDialog 클래스를 기반으로 하여 CDialog 클래스의 기능을 계승받은 클래스들로 구성되어 있으며, 클래스의 상속관계는 그림 2와 같다.

자료의 입력과정에서는 CFileDialog, CInputDialog, CCtrlData, CMaterial, CRkbtMat 클래스, 굴착정보 입력시에는 CExcaDlg 클래스, 후처리기능 선택과정에는 CShowState 클래스가 사용되었다. 이러한 대화상자 클래스를 이용하여 그래픽 사용자 인터페이스(GUI)를 구현하였고 화면상에서 키보드나 마우스로 손쉽게 자료를 입력할 수 있다.

2.3 유한요소 구조해석 클래스

일반적인 유한요소해석에 필요한 클래스로는 Node, Element, Matrix, FEM Solver 클래스 등이 있다. FAUSS에서 사용된 Node 클래스는 절점번호, 절점의 x, y 좌표, x, y 방향 구속상태, x, y 방향 변위량 등의 정보를 가지며, Element 클래스는 요소번호, 요소연결절점번호, 물성번호, 가우스포인트에 대한 정보가 있는 GaussPoint 클래스를 포함한다. GaussPoint 클래스는 가우스포인트에서의 가우스포인트번호, 좌표, 응력, 주응력, 주응력방향에 대한 정보를 다룬다. Matrix 클래스는 행렬의 덧셈, 곱셈, 역행렬, 전치행렬 등의 기본적인 행렬연산에 대한 함수들로 구성되어 있다. FEM Solver 클래스는 요소의 강성도행렬과 전체강성도행렬을 구성하고 하중벡터를 구하고 Frontal Solver 를 이용하여 변위벡터를 계산하는 기능을 한다. 물성정보 클래스는 탄성계수, 포아송비 등과 같은 기본적인 물성과 지하수의 흐름해석에 필요한 x, y방향 투수계수, 저류계수, 포화단위중량 등의 물성도 포함하고 있다.

지하수 흐름을 고려하기 위하여 덧붙여진 클래스로는 흐름의 경계조건 클래스 FixHeadSet 과 굴착정보 클래스 Excavation 이 대표적이다. 여기서 클래스 FixHeadSet 은 각각의 흐름의 경계조건 조합에 대해, 포함된 절점의 수, 포함된 절점번호와 그 절점에서의 전수두 정보를 가진다. 클래스 Excavation 은 굴착단계번호, 굴착단계제목, 굴착된 요소, 제거된 절점, 흐름의 경계조건 조합, 사용된 rock bolt 번호, 하중증가율, 하중증가회수 등 대부분의 굴착해석 정보를 포함한다.

2.4 그래픽 라이브러리 클래스

후처리의 상당부분은 그래픽처리부분이 차지한다. 사용자가 한눈에 해석결과의 양상을 파악하기 위해서는 수치의 나열보다는 화면에 나타난 그래픽이 뛰어난 기능을 발휘한다. 따라서 후처리에서의 그래픽 처리속도와 표시방법이 상당히 중요하다. FAUSS에서는 윈도우95 환경에서 최상의 속도와 기능을 하도록 Visual C++에서 제공하는 MFC 그래픽 라이브러리 클래스^[2]를 사용하였다. 주로 사용된 클래스는 CPen, CBrush이고, Line, Polygon, Ellipse 함수와 그래픽모드에서 텍스트를 사용하여 도화작업을 수행하였다.

3. 프로그램의 구성

본 연구에서 개발한 프로그램 FAUSS는 구조해석, 전처리, 후처리가 윈도우95 환경에서 통합운영되는 시스템을 갖추었다. FAUSS의 구성은 크게 나누어 대화상자를 통한 자료의 입력, 지하수 흐름을 고려한 지하구조계의 탄소성해석, 해석결과의 도화처리 세부분으로 구성되어 있다.

3.1 자료의 입력

자료의 입력기능에서는 대화상자(Dialog Box), 풀다운(Pull-Down), 단축아이콘 등의 그래픽 사용자 인터페이스를 사용하여 구조해석에 약간의 개념을 가진 사용자라면 누구나 쉽게 해석에 필요한 자료를 작성할 수 있게 하였다.

자료의 입력은 그림 3과 같은 입력대화상자로부터 수행된다. 입력대화상자는 크게 제어자료, 파일자료, 물성자료의 세부분으로 구성되어 있다. 제어자료부분은 또다시 하나의 하위대화상자로 되어 있으며 구조계 해석에 필요한 제어자료를 화면상에서 키보드를 통해 쉽게 입력할 수 있다. 파일자료부분은 미리 준비한 절점좌표, 요소연결, 구조계의 경계조건, 흐름의 경계조건, 하중조건, rock bolt 연결 자료의 파일경로를 파일대화상자를 통해서 입력한다. 물성자료부분은 구조계물성 하위대화상자와 rock bolt 물성 하위대화상자를 통하여 해석에 필요한 물성들을 순서와 배치의 혼돈없이 입력할 수 있게 하였다.

3.2 계산의 수행

지하수 흐름을 고려한 해석은 굴착단계별로 해석하고 각 굴착단계는 하중증분에 따라 나누는 하중단계마다 해석을 하게 된다. 따라서 굴착단계별로 해당굴착단계에 필요한 굴착정보를 입력해야한다. 하중증가회수, 하중증가율, 흐름해석에서의 시간증가량, 흐름의 경계조건 조합번호, 제거된 절점번호, 제거된 요소번호 등과 같은 굴착정보가 입력되며 이러한 자료들도 그림 4와 같은 굴착정보대화상자를 사용하여 손쉽게 입력할 수 있다.

3.2.1 지하수의 천이흐름을 고려한 지하구조계의 모형화

지하구조계의 거동을 예측하기 위하여 탄소성 유한요소해석 프로그램^[3]을 이용하였다. 본 연구에서 사용한 유한요소해석 프로그램은 탄소성기본이론을 적용하여 재료의 비선형성을 고려하였고, 다공매체의 지배방정식과 지하수의 천이흐름방정식을 이용하여 지하수의 천이흐름을 고려하였다.^[4] 또한, 시공단계에 따른 굴착의 영향을 고려할 수 있도록 초기응력의 변화를 고려한 굴착이론을 사용하였다.

3.2.2 지하수 천이흐름의 모형화

천이흐름의 기본방정식은 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.^[5]

$$-v_{i,i} + q = S_s \dot{h} \quad (1)$$

여기서 q 는 제어체적에 유입되는 비유량(specified flow rate)이며, h 는 수두, S_s (specific storage)는 수두의 단위하강에 대해 대수층의 단위체적이 방출하는 수량으로 정의되는 저유계수(storage coefficient)이다. v 는 천이흐름의 유속으로써 식 (2)과 같이 정의된다.

$$v_i = k^i h_{,i} \quad (2)$$

여기서 k^i 는 x_i 방향 투수계수이다.

식 (1)을 적분하여 가중잔차식을 구성하고 이산화하면 식 (3)과 같이 천이흐름의 행렬식으로 표현할 수 있다. 이 행렬식으로 시간증분에 따른 반복계산으로 임의의 경과시간에서 변화된 총수두를 구할 수 있다.

$$[C] \{\dot{h}\} + [G] \{h\} = \{Q\} \quad (3)$$

여기서 $[C]$ 는 저유행렬, $[G]$ 는 전도행렬, $\{Q\}$ 는 유량벡터를 의미한다. 식 (3)은 $\{\dot{h}\}$ 를 포함하는 상미분 방정식이므로 해를 구하기 위해서는 식 (4)와 같은 시간증분 형태로 나타낼 수 있다.

$$([C] + \omega \Delta t [G]) \{h\}_{t+\Delta t} = ([C] - (1-\omega)\Delta t [G]) \{h\}_t + \Delta t ((1-\omega)\{Q\}_t + \omega\{Q\}_{t+\Delta t}) \quad (4)$$

여기서 ω 는 $0 \leq \omega \leq 1$ 범위의 값으로 유한차분의 종류를 결정하는 상수이고, Δt 는 시간증분을 의미한다. 식 (4)로부터 임의의 시간 t 에서의 총수두를 안다면 $t+\Delta t$ 단계의 총수두를 구할 수 있다. 식 (4)에서 구한 총수두 h 를 간극수압으로 표현하기 위해서 식 (5)를 이용한다.

$$\pi = \gamma_w (h - h_{EL}) \quad (5)$$

여기서 h_{EL} 은 위치수두, π 는 간극수압, γ_w 는 물의 단위중량을 나타낸다.

연속체내의 한 점에서 다공매체의 평형방정식은 식 (6)과 같다.

$$\sigma'_{ij,j} + \delta_{ij} \pi_{,j} + b_i = 0 \quad (6)$$

여기서 σ'_{ij} 은 유효응력텐서 성분이고 δ_{ij} 는 Kronecker delta이며, b_i 는 물체력 성분이다. 식 (6)을 적분하여 가중잔차식을 구성하고 이산화하면 식 (7)과 같은 행렬형태의 평형방정식으로 나타낼 수 있다.

$$[K] \{\bar{U}\} + [L] \{\bar{\pi}\} = \{F\} \quad (7)$$

여기서 $[K]$ 는 강성행렬, $[L]$ 은 조합행렬, $\{F\}$ 는 하중벡터이고, $\{\bar{U}\}$ 는 변위의 미지벡터, $\{\bar{\pi}\}$ 는 간극수압의 미지벡터이다. 따라서, 천이흐름방정식으로부터 시간해석에 의한 총수두를 구하고, 구해진 총수두를 식 (4)에 대입하여 간극수압을 구한 후, 이 값을 다시 식 (6)의 평형방정식에 대입하여 최종적으로 변위와 응력을 구한다.

3.2.3 지하수위 해석을 고려한 탄소성 유한요소해석의 흐름도

지하수의 천이흐름으로 인하여 시간경과에 따라 지하수위와 간극수압이 변하게 되고 이는 지하구조계의 유효응력에 변화를 가져오게 된다. 이 과정이 프로그램에서 구현되려면 각 시간단계에서 필요한 간극수압을 먼저 산출하고 이것을 구조계의 하중항에 포함시킨다.

전체적인 탄소성 유한요소해석의 흐름은 현재 시간단계에서 간극수압이 고려된 각 절점의 하중을 계산하고 산정된 하중을 시간 및 골착단계별로 증가시키면서 소성영역이 발생한 요소의 강성도를 재구성한다. 계산된 하중과 강성도 행렬로부터 변위를 구하고 이로부터 잉여력을 계산하며

이 잉여력을 다시 하중으로 변환하여 수렴치를 계산하게 된다. 이상의 과정을 반복 수행하면서 하중으로 변환된 잉여력이 수렴되어 허용수렴치보다 작아지는 경우에 변위와 응력, 탄소성 변형률 등을 구하게 되어 이 시점에서의 구조해석을 완료하는 것으로 한다.

3.3 후처리기능

후처리기능은 해석한 결과를 사용자가 쉽게 파악할 수 있도록 그래픽기능을 통하여 도화처리된다. 후처리기능의 선택사항은 그림 5와 같은 후처리대화상자를 통하여 설정한다.

FAUSS의 후처리기능은 개별적인 후처리와 추가적인 후처리로 구별할 수 있다. 개별적인 후처리란 변위도나 주응력도와 같이 함께 도화할 수 없고 따로따로 도화해야하는 영역을 말한다. 예를 들어 구조계의 변위와 주응력을 동시에 도화하면 그래픽의 혼란함으로 인하여 작업의 효율성을 저하하게 된다. 이럴 경우 개별적으로 각각의 영역을 도화해 주는 것이 바람직하며 이러한 성격이 지배적인 후처리기능을 개별적인 후처리라 하겠다. 추가적인 후처리라는 것은 요소번호 혹은 절점번호와 같이 한 화면에 중첩되어 표시되는 것이 유리한 후처리 기능을 말한다. 즉 유한요소망을 검토함에 있어서 요소번호와 절점번호를 동시에 보여줌으로써 보다 효율적인 작업을 할 수 있는 경우이다. 개별적인 후처리로는 유한요소망, 변위도, 물성표시, 주응력도, 등응력선도, 수위도, rock bolt 응력도 등이 있고, 추가적인 후처리로는 요소번호, 절점번호, 지점조건 등이 있다.

4. 예제해석

해석대상 지반은 지표에서 지하 100m 까지와 지하 100m 에서 지하 110m 까지 두층으로 나뉘어지고 각층의 물성은 표 1과 같으며, 지표에서 50m 깊이에 반지름 5m 의 터널을 굴착하였다. 최초의 지하수위는 지표면 아래 10m 지점에 위치하며 해석 대상이 좌우대칭이므로 반단면 해석을 위한 모형을 고려하였다. 터널에서 우측으로 80m 떨어진 곳에서는 지하수의 유입이 계속되어 일정한 수위를 유지한다고 가정하여 수두의 경계조건을 만족하도록 하였고, 터널의 굴착이 이루어지면 굴착면의 총수두는 위치수두가 되도록 경계조건을 구성하였다. 총 333 개의 요소와 총 373 개의 절점으로 유한요소망을 구성하였고, 굴착은 2단계 굴착을 하였으며 각 굴착단계는 네번의 하중단계로 나누어 하중을 증가시켰다.

4.1 후처리결과

4.1.1 개별적인 후처리기능

유한요소망 후처리는 가장 기본적인 후처리기능으로 절점좌표와 요소망연결 자료로부터 각 굴착단계와 하중단계에서의 요소망을 도화한다. 동시에 우측 윈도우에서는 총절점수, 총요소수, 현재 화면에 보이는 절점수, 요소수를 표시해준다. 변위도 후처리는 그림 6에서 보는 바와 같이 각 단계별로 구조물의 변형된 형태와 변형전 형태를 중첩시켜 보여줌으로써 변위의 양상을 파악하는데 도움을 주는 기능이다. 물성표시 후처리는 요소별로 상이한 물성을 다른 색채로 표시하여 층의 구분을 식별하는데 도움을 주는 기능이다. 또한 요소의 물성번호 입력상태도 확인할 수 있다. 그림 7의 주응력도 후처리는 각 단계마다 요소의 가우스포인트에서의 최소주응력과 최대주응력을 벡터양식으로 보여준다. 압축과 인장에 대해 다른 색으로 표현하여 전반적인 응력의 분포를 파악할 수 있게 하였고, 응력의 크기가 너무 작거나 큰 경우를 위해 응력확대계수를 사용하여 크기의 조정이 가능하도록 하였다. 그림 8에 나타난 등응력선도 후처리는 응력이 같은 점을 연결하여 등응력선의 조밀함으로써 응력이 집중되는 부분을 쉽게 파악할 수 있는 기능을 한다. 등응력선은 가우스포인트에서의 응력으로부터 절점에서의 응력을 계산하고 부요소의 절점에서의 응력을 내삽함수(Interpolation Function) 를 이용하여 결정된 후 부요소 면내의 응력이 같은 지점을 연결해 나갔다.^[6] 등응력선이 그려지는 응력의 간격을 너무 작게 하게되면 도화하는데 쓸모 없는 시간을 들이게 되므로 응력간격을 사용자가 입력함으로써 적절한 간격으로 표시할 수 있다. 수위도 후처리는 시간경과에 따른 지하수위의 변화를 나타내기 위한 기능이며, 요소의 모든 절점에서의 압력

수두가 0이 될 경우 요소내에 물이 존재하지 않게 되는 방법으로 구현하였기 때문에 그림 9와 같이 미려한 곡선으로 보이지는 않고 요소단위로 개략적인 수위형상을 보여준다. 그림 10의 rock bolt 응력 후처리는 rock bolt에 작용하는 축방향응력을 도화해 주는 기능을 가진다.

4.1.2 추가적인 후처리기능

요소번호 후처리와 절점번호 후처리는 앞에서 설명한 개별적인 후처리에 중첩되어 요소번호와 절점번호를 표시해주는 기능을 하며, 요소망 구성의 검토를 용이하게 할 수 있다. 지점조건 후처리는 구조물의 경계조건을 구별하여 표시하는 기능을 가지며, 잘못된 지점데이터 입력오류를 쉽게 찾아 낼 수 있다. 확대·축소 후처리는 마우스 조작을 통해서 원하는 부분만을 확대하여 볼 수 있도록 하는 기능으로, 그림 11과 같이 요소가 작고 요소망이 조밀한 부분의 변위, 주응력, 등응력 선도, 요소번호, 절점번호 등을 확인하는데 유용하게 쓰인다.

5. 결론

본 연구를 통하여 지하수 흐름을 고려한 지하구조계의 탄소성 유한요소해석 통합운영프로그램을 개발하였고, 윈도우95 환경 하에서 풀다운 메뉴, 대화상자, 단축아이콘 등의 그래픽 사용자 인터페이스를 이용하여 지하구조해석에 대한 전반적인 과정의 진행을 사용자가 편리하게 사용할 수 있게 하였다. 그래픽을 통한 개별적인 후처리 기능을 이용하여 해석결과에 대한 전체적인 양상의 파악이 용이하였으며, 추가적인 후처리 기능을 이용하여 전처리과정에서 사용자의 실수로 발생한 입력 데이터의 오류를 쉽게 발견할 수 있었다.

일반적인 탄소성 유한요소해석에 굴착의 영향, 굴착에 의한 지하수 흐름의 해석과 지보재로 사용된 록 볼트의 거동을 고려함으로써 보다 실제문제에 접근된 지하구조해석을 수행할 수 있었다.

지하수위에 대한 후처리의 기능을 확대하기 위해 본 프로그램에서 사용된 등응력선도의 표현기법을 응용하면 요소망의 형태를 따라 불연속적으로 나타나는 침윤선을 부드러운 곡선의 형태로 나타낼 수 있고, 흐름에 따라 변화되는 유선망을 작도할 수 있는 가능성을 발견하였다. 이와 같이 주어진 문제에 대한 모듈별 프로그램의 개발이 가능하며, 더 나은 프로그램 기능을 위해 모듈의 추가, 삭제가 쉽게 이루어질 수 있음을 알 수 있었다.

6. 참고문헌

1. Microsoft Corporation, *Programming with MFC and Win 32*, Vol. 2, Microsoft Press, 1995.
2. David, J.K., *Inside Visual C++*, Microsoft Press, 1995.
3. Owen, D.R.J. and Hinton, E., *Finite Elements in Plasticity*, Pineridge Press, 1980.
4. 김형관, **지하수의 천이흐름을 고려한 지하구조계의 탄소성해석**, 연세대학교 본대학원 토목공학과 석사학위 논문, 1996.
5. 박성우, **지하수위의 변화를 고려한 지하구조계의 유한요소해석**, 연세대학교 본대학원 토목공학과 석사학위 논문, 1995.
6. 이종우, **유한요소 후처리 기법의 개선에 관한 연구**, 연세대학교 본대학원 토목공학과 석사학위 논문, 1990.

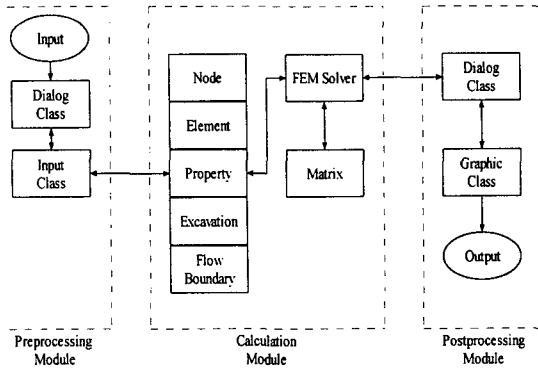


그림 1 자료의 흐름과 관계

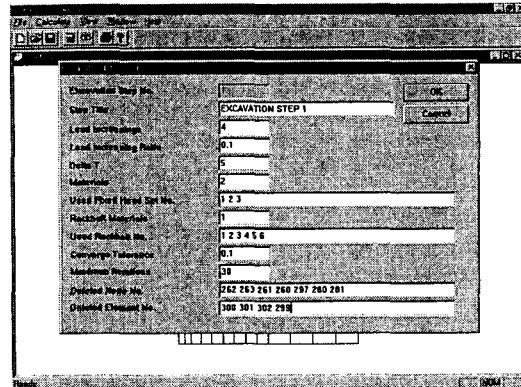


그림 4 굴착정보대화상자

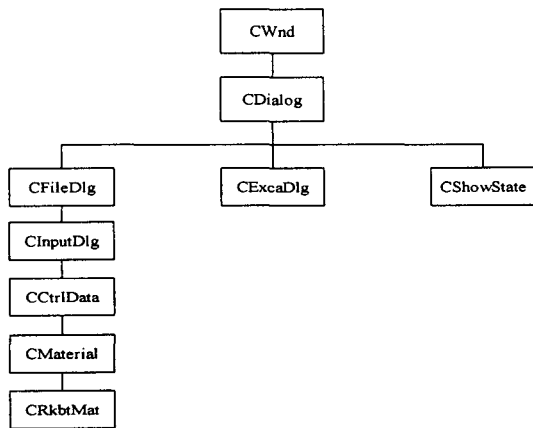


그림 2 대화상자 클래스의 상속관계

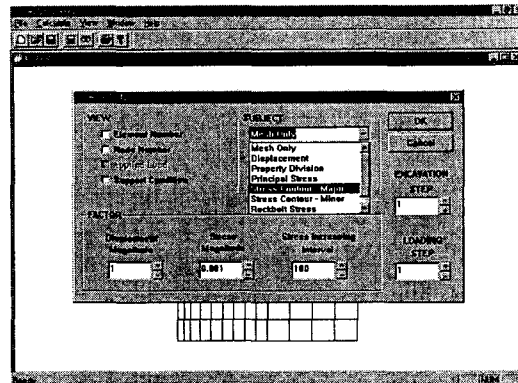


그림 5 후처리대화상자

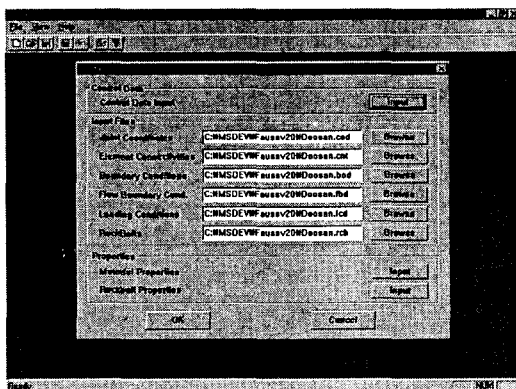


그림 3 입력대화상자

표 1. 해석모형의 지반물성

물성치	물성 1	물성 2
탄성계수(tonf/m ²)	3,000	10,100
포아송비	0.3	0.35
단위중량(tonf/m ³)	2.0	2.3
점착력(tonf/m)	2.0	3.0
내부마찰각(°)	28.0	30.0
x방향 투수계수(m/day)	0.1	0.1
y방향 투수계수(m/day)	0.1	0.1
정지토압계수	0.5	0.5
저류계수(1/m)	0.2	0.2

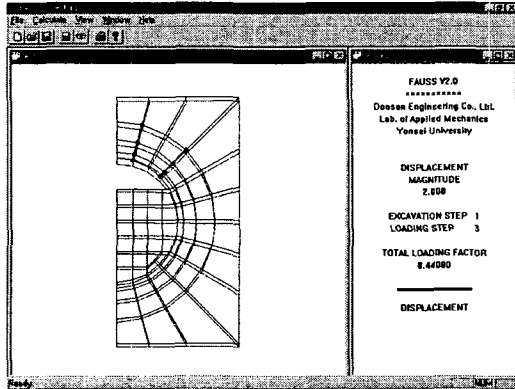


그림 6 변위도

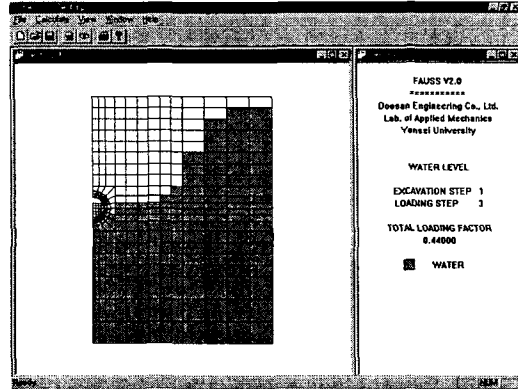


그림 9 지하수위도

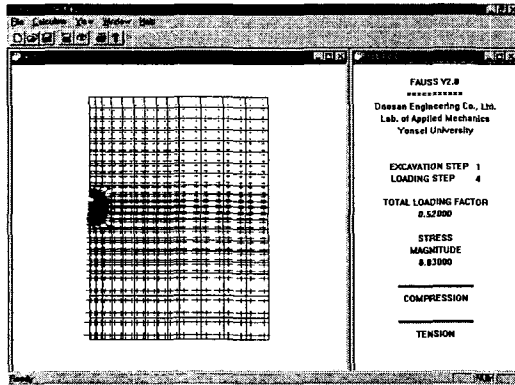


그림 7 주응력도

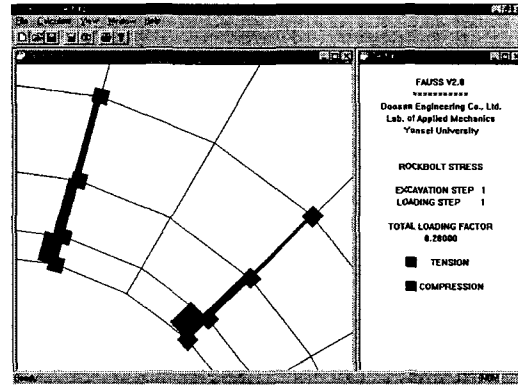


그림 10 Rockbolt 응력도

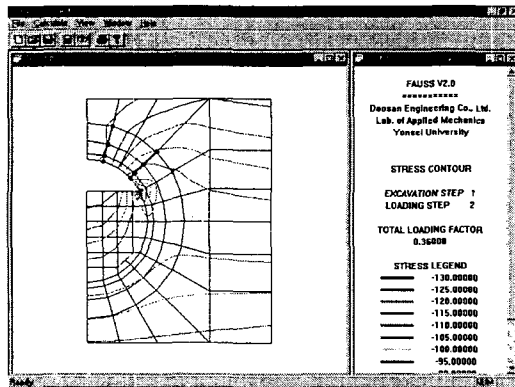


그림 8 등응력선도

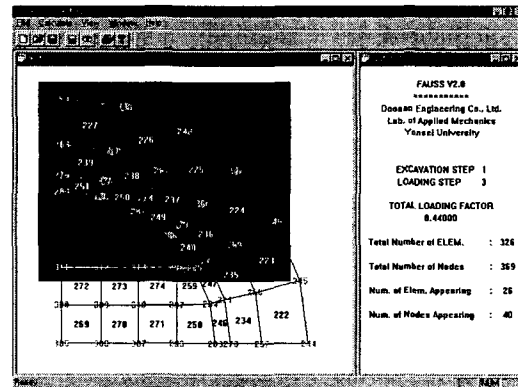


그림 11 확대·축소 기능