

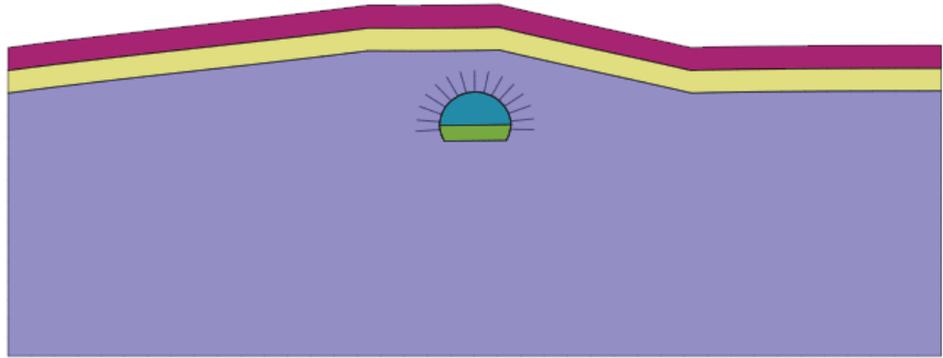
2 차원 터널 시공단계해석

Section 1

학습목표 및 개요

1.1 학습목표

터널 해석의 주 목적은 주어진 설계 및 시공과정의 적절성 및 안정성 여부를 파악하는데 있습니다. 수치해석을 통해 터널시공 이전에 터널의 굴착주변에 발생하는 변형 및 침하를 판별하고, 슛크리트 및 록볼트의 발생응력을 종합적으로 분석하여 시공시 예상되는 문제점을 사전에 미리 예측할 수 있습니다. 해석에 필요한 입력자료는 지반특성치, 지반의 초기응력, 지보재 특성치 등이 있으며, 지반의 초기응력은 터널거동에 큰 영향을 미치므로, 매개변수(축압계수)를 변경시켜가면서 터널의 안정성 평가를 수행하는 것이 필요합니다.



본 예제를 통해 다음과 같은 주요 기능 및 해석방법을 학습할 수 있습니다.

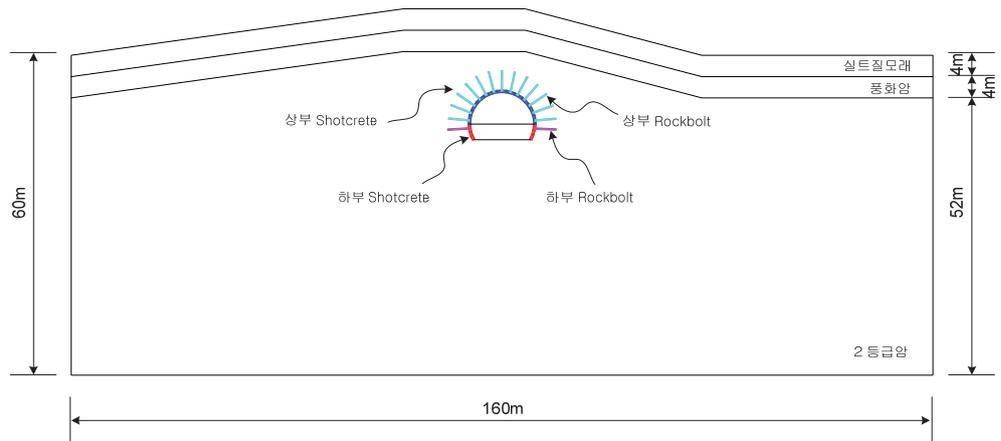
- 기하형상 불러오기
- 지반/구조물성 정의하기
- 요소망 작성
- 1차 지보재 Shotcrete, Rockbolt 모델링
- 물성변경(해석전, 해석중)
- 시공단계 정의(LDF 체크)
- 매개변수해석
- 결과 분석 - 시공단계 해석결과 그래프 및 테이블 출력



1.2 모델 및 해석 개요

본 모델은 내부에 1 개의 터널이 있는 산악 지형의 단면 형상입니다. 지층은 상부 실트질 모래가 4m 층후로 분포하고 있으며, 하부에 풍화암, 2 등급암의 지층으로 구성되어 있습니다. 원지반 상태에서 굴착이 이루어진 후 1차 지보재인 Shotcrete 와 Rockbolt 가 설치되며, 이후 Shotcrete 가 경화되는 단계를 모사합니다.

▶ 해석단면



지반 및 구조 재료를 정의한 후 요소망 생성시 각 요소에 할당할 특성을 정의합니다.

Section 2

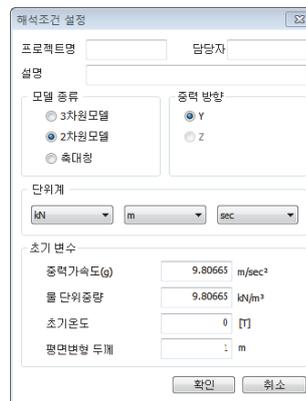
해석조건 설정

[첨부된 시작파일(01_1arch_start)을 엽니다.]

*  : 해석 > 해석케이스 > 해석설정 (Analysis > Analysis Case > Setting)

- 모델 종류, 중력방향 및 초기변수를 설정합니다. 해석에 적용될 사용단위계를 확인합니다. 단위계는 모델링 과정 및 해석결과 확인시 변경 가능하며, 설정된 단위계에 따라 입력파라미터는 자동 환산됩니다.
- 본 예제는 2 차원 형상으로 단위계는 SI 단위(kN,m) 를 사용합니다.

▶ 해석조건 설정



Tip

우측 하단의 단위변환계를 통해 입력단위계를 쉽게 변환하여 입력할 수 있습니다. 2 차원의 경우 XY 좌표평면에서 이루어지며, 3 차원의 경우 중력가속도 방향을 Y 방향 또는 Z 방향으로 정의할 수 있습니다.



Section 3

3.1 지반 및 구조재료 정의

재료 및 구조재료 정의

지반 재료의 경우 Mohr-Coulomb 모델로 정의하며, 구조 재료의 경우 재료 비선형성을 고려하지 않은 Elastic 모델을 적용합니다. 2 등급암의 경우 K0 값에 따라 총 4 개의 재료특성을 정의합니다.

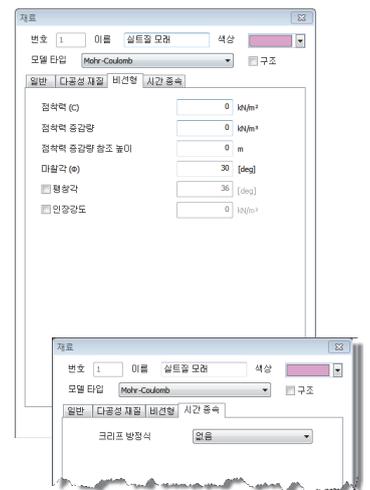
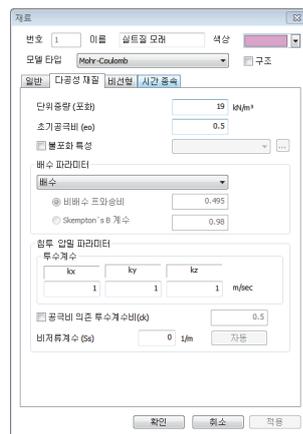
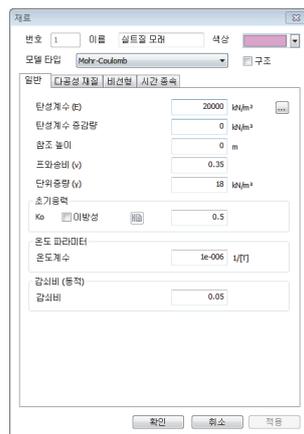
각 지층 / 구조부재에 사용된 재료는 아래 테이블과 같습니다.

[단위 : KN, m]

▶ 표. 지반재료

이름	실트질모래	풍화암	2 등급암-1	2 등급암-2	2 등급암-3	2 등급암-4
재료	등방성	등방성	등방성	등방성	등방성	등방성
모델 타입	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb
일반						
탄성계수(E)	2.0E+04	2.0E+05	1.0E+07	1.0E+07	1.0E+07	1.0E+07
프와송비(v)	0.35	0.33	0.22	0.22	0.22	0.22
단위중량(r)	18	21	26	26	26	26
Ko	0.5	0.5	0.5	1.0	1.5	2.0
다공성 재질						
단위중량(포화)	19	22	27	27	27	27
Initial Void Ratio(eo)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
배수파라미터	배수	배수	배수	배수	배수	배수
비선형						
점착력(C)	0	30	3000	3000	3000	3000
마찰각	30	33	43	43	43	43
시간종속						
크리프 방정식	없음	없음	없음	없음	없음	없음

- ▶ 지반재료정의-일반
- ▶▶ 지반재료정의-다공성재질
- ▶▶▶ 지반재료정의-비선형



[단위 : KN, m]

▶ 표. 구조재료

이름	Soft S/C	Hard S/C	Rockbolt
재료	등방성	등방성	등방성
모델타입	Elastic	Elastic	Elastic
탄성계수(E)	0.5E+07	1.5E+07	2.10E+08
프와송비(ν)	0.3	0.3	0.3
단위중량(γ)	24	24	78

▶ 구조재료 정의



Tip

재료특성은 기존 해석파일로부터 정보를 불러들여올 수 있으며, 양식에 맞게 정리된 엑셀형식의 파일부터도 정보를 불러올 수 있습니다.
구조재료의 경우 모델타입 옆 [구조]를 체크하여 정의하실 수 있습니다. 구조옵션이 체크된 경우 해당재료의 수위관련 파라미터는 고려되지 않습니다.

3.2 특성 정의

지반특성의 경우 어떤 지반 재료를 사용할지 설정하며, 구조특성의 경우 구조부재 종류 및 단면 형상(단면강성)을 추가로 설정합니다. 축/전단/휨에 대해 저항하는 Shotcrete 는 Beam 요소로, 축방향력에만 저항하는 Rockbolt 는 Truss 요소를 사용합니다.

Beam 요소는 2/3 개의 절점에 의해 정의되는 1 차원 선요소이며, 단면의 치수에 비하여 길이가 긴 부재가 굽힘 변형을 받을 때 주로 사용할 수 있습니다. 길이에 대한 단면의 폭 또는 높이비가 대략 1/5 보다 커질 경우에는 전단변형에 의한 영향이 매우 커지게 되므로, beam 요소를 사용하지 않고 shell 요소나 solid 요소를 사용하는 것이 바람직합니다.

Truss 요소는 2 개의 절점에 의해 정의되는 1 차원 선 요소이며, 일반적으로 공간트러스(space truss) 또는 대각부재(diagonal brace) 등 단면적에 비해 길이가 긴 부재를 모델링 하는데 사용할 있습니다. 주로 앵커, 네일, 록볼트와 같은 힘 거동이 무시된 구조적 요소를 모델링 하는데 사용됩니다.

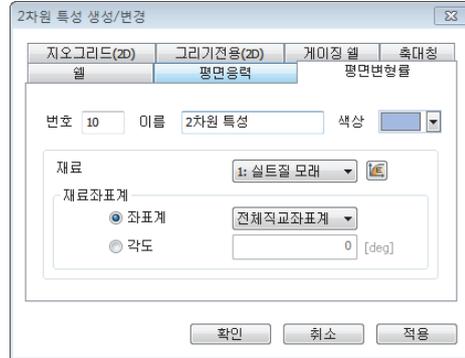
각 구조부재의 특성은 아래 테이블과 같습니다.

▶ 표. 지반특성

[단위 : KN, m]						
이름	실트질모래	풍화암	2 등급암-1	2 등급암-2	2 등급암-3	2 등급암-4
종류	2D	2D	2D	2D	2D	2D
인터페이스 종류	평면변형률	평면변형률	평면변형률	평면변형률	평면변형률	평면변형률
재료	실트질모래	풍화암	2 등급암-1	2 등급암-2	2 등급암-3	2 등급암-4



▶ 지반특성 정의

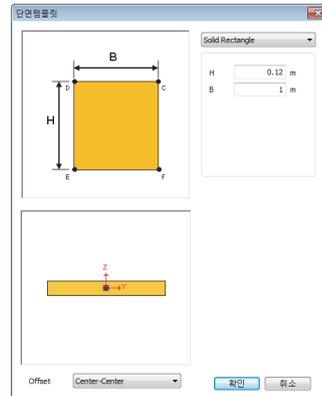


각 구조부재의 특성은 아래 테이블과 같습니다. 단면형상을 설정하면 단면강성은 자동계산 됩니다.

[단위 : KN, m]

이름	Soft S/C	Hard S/C	Rockbolt
종류	1D	1D	1D
모델 타입	보	보	트러스
재료	Soft S/C	Hard S/C	Rockbolt
단면간격	-	-	1.5
단면형상	Rectangle	Rectangle	Solid Round
단면크기	H=0,12, B=1	H=0,12, B=1	D=0,025

▶ 구조특성 정의





Section 4 모델링

본 예제는 2 차원 형상 및 요소 생성, 단계별 해석 및 결과분석에 초점을 맞추었으며, 기본적인 지반/구조 재료특성이 입력된 시작파일로부터 학습을 시작합니다.

4.1 기하형상 모델링

*  : 불러오기 > DXF 2D(와이어프레임) (Main Menu > Import > DXF 2D(Wireframe)...)

AutoCAD R13 이상 버전의 DXF 파일을 불러올 수 있습니다.

- 01_1arch.dxf 파일을 불러옵니다.

*  : 형상 > 점과 선 > 교차선 끊기 (Geometry > Point & Curve > Intersect)

교차하는 부분에 절점을 생성하기 위해 이 작업을 수행합니다.

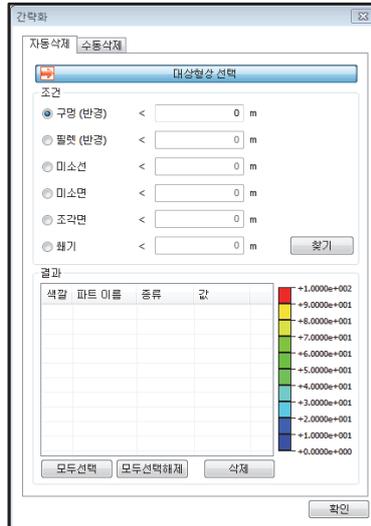
- 모든 선들을 선택하고 확인을 누릅니다.

*  : 형상 > 형상삭제 > 면/선 삭제 (Geometry > Remove > Face/Edge)

교차선 끊기 작업 이후 미소선(small edge)가 존재하는지를 확인합니다.

- 미소선을 선택하고, 미소선의 값을 0.01로 입력합니다.
- [찾기]를 클릭하면 0.01보다 작은 선들이 결과창에 표시됩니다.
- 해당 선들을 선택하여 위치를 확인하고, 불필요한 선일 경우 [삭제] 합니다.

▶ 간략화-면/선 삭제



미소선이나 미소면이 존재하는 경우 해당위치에 절점이 생성되게 됩니다. 이러한 미소절점의 경우 해당위치에서 변위나 응력이 집중되는 결과가 나타날 수 있으며 복잡한 모델에서는 요소망이 정상적으로 생성되지 않을 수 있으므로 반드시 미소선이나 미소면의 제거가 필요합니다.

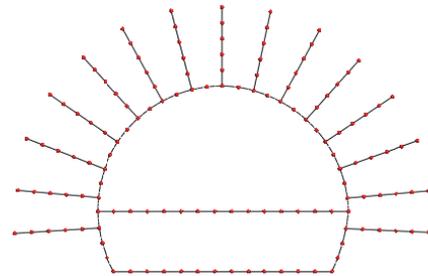
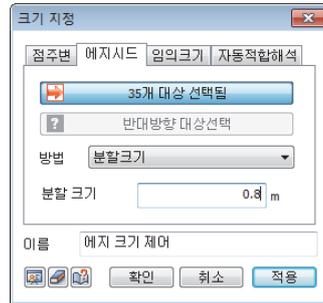


4.2 요소망 생성

*  : 요소망 > 제어 > 크기지정 (Mesh > Control > Size Ctrl.)

요소의 크기를 미리 지정합니다.

- 터널에 해당하는 에지들을 모두 선택합니다.
- 분할크기에 0.8을 입력하고 [적용]버튼을 누릅니다.



Tip

요소망의 형상 및 품질은 유한요소해석에서 매우 중요한 부분입니다. 주로 압축, 전단변형에 의한 소성파괴가 발생하는 지반의 경우 3 차원은 육면체 중심으로, 2 차원은 사각형 중심으로 요소를 생성하는 것이 안정적인 해석에 도움이 됩니다. 사상 요소망 또는 육면체 중심의 하이브리드 자동요소망 기능을 이용하여 요소를 생성합니다. 요소크기는 작을수록 좋은 품질로 생성되지만 해석의 효율성을 고려하여 크기를 결정하는 것이 좋습니다.

하지만 크기를 작게 설정하는 만큼 해석시간도 늘어나기 때문에, 결과를 보고자 하는 영역(터널 부근)에는 다른 부분보다 조밀하게 요소망을 생성합니다.

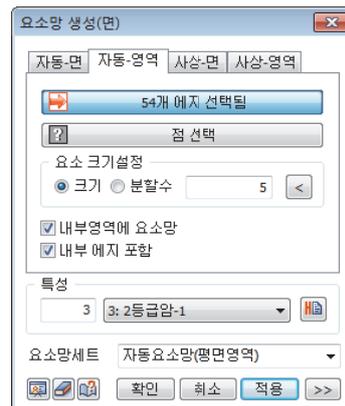
지정된 에지크기는 작업트리 > 요소망제어 > 크기지정항목을 체크하여 화면상에 보이기 설정을 할 수 있습니다.

*  : 요소망 > 생성 > 2D (Mesh > Generate > 2D)

평면상에서 경계선으로 정의된 평면상의 영역에 대해 2D 요소망을 생성합니다.

- 자동-영역 탭에서 모든 에지(54 개)를 선택합니다.
- 요소크기를 5로 설정합니다.
- 내부영역에 요소망을 체크합니다.
- 특성을 2등급암-1로 지정합니다.

▶ 요소망 생성(자동-영역)





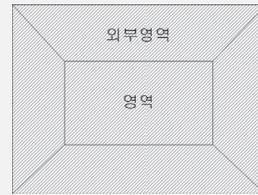
Tip

요소망 생성시 선택한 영역이 내/외부 두 구역에 존재하는 경우 [내부영역에 요소망] 옵션을 체크함으로써, 두 영역 모두 요소망을 생성할 수 있습니다.

내부영역이란 외부 경계에 연결되어 있지 않고 전체 영역의 내부에 따로 존재하는 영역을 뜻합니다. 예를 들면, 사각형 영역의 내부에 작은 사각형이 하나 더 있는 경우 내부의 작은 사각형의 영역이 내부 영역이 됩니다. 하지만 작은 사각형과 밖의 큰 사각형이 선으로 이어져 있는 경우에는 작은 사각형은 더 이상 내부 영역이 아닙니다.

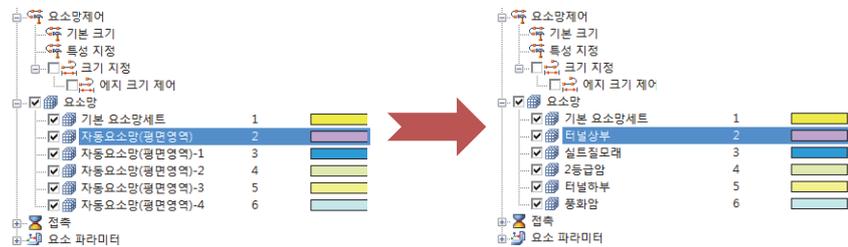


(a) 내부영역 존재



(b) 내부영역 없음

- 이름 및 물성변경
생성된 요소망의 이름을 변경합니다. 좌측 작업트리에서 F2 번키를 이용하여 이름을 변경할 수 있습니다. 물성변경의 경우 요소파라미터 변경을 통해 다른 특성을 변경할 수 있습니다.
- 좌측 작업트리 > 요소망에서 체크박스를 통해 화면상으로 해당요소망 세트 영역을 확인한 후 F2 키를 이용하여 이름을 변경합니다.

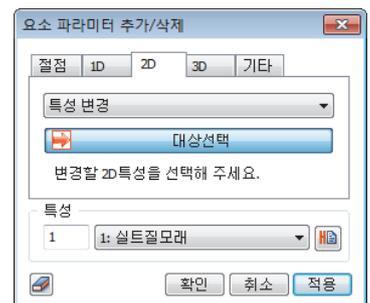
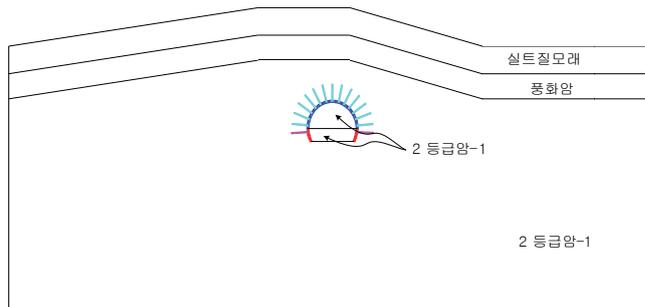


* : 요소망 > 요소 > 파라미터 (Mesh > Element > Parameters)

만들어진 요소망의 특성을 바꿔줍니다.

- 2D 탭을 선택합니다.
- 아래 단면도를 참고하여 변경될 요소망과 특성을 지정한 후 [적용] 버튼을 누릅니다. (특성변경 대상 선택시 좌측 작업트리에 등록된 요소망세트를 이용하시면 손쉽게 해당 요소망을 선택할 수 있습니다.)
- 보기모드(요소망) > 특성색상을 통해 요소에 입력된 물성정보를 확인할 수 있습니다.

▶ 요소특성 변경



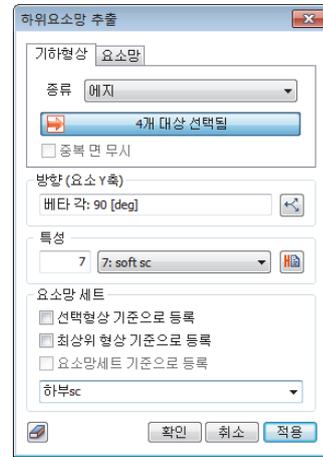
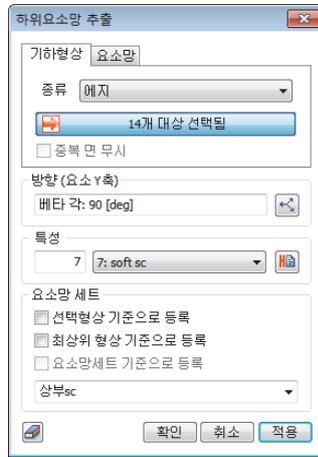


*  : 요소망 > 요소 > 하위요소추출 (Mesh > Element > Extract)

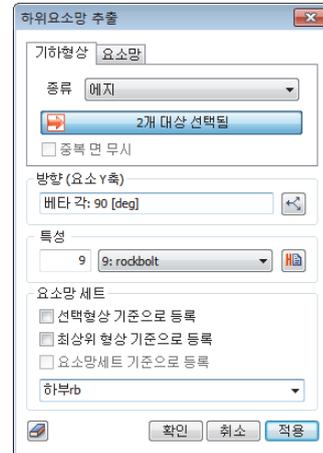
1 차 지보재인 Shotcrete 와 Rockbolt 를 생성하는 과정입니다. Shotcrete 는 축/전단/휨에 저항하는 Beam 요소이며, Rockbolt 는 축력에만 저항하는 Truss 요소로 모델링합니다. Beam/Truss 요소 모두 지반과 절점을 공유해야 하므로, 하위요소 추출을 이용합니다.

- 상부 Shotcrete 에 해당되는 에지들을 선택합니다. (page 2. 해석단면 참조)
- 특성을 soft s/c 로 지정합니다.
- 요소망세트에 상부 s/c 로 입력합니다.
- 같은 방법으로 하부 s/c, 상부 rockbolt, 하부 rockbolt 요소망을 생성합니다.

- ▶ 상부 Shotcrete 생성
- ▶▶ 하부 Shotcrete 생성



- ▶ 상부 Rockbolt 생성
- ▶▶ 하부 Rockbolt 생성



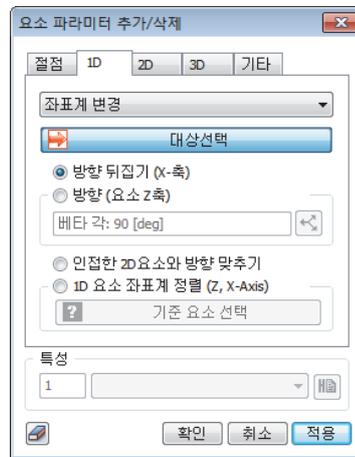


*  : 요소망 > 요소 > 요소파라미터 (Mesh > Element > Parameters)

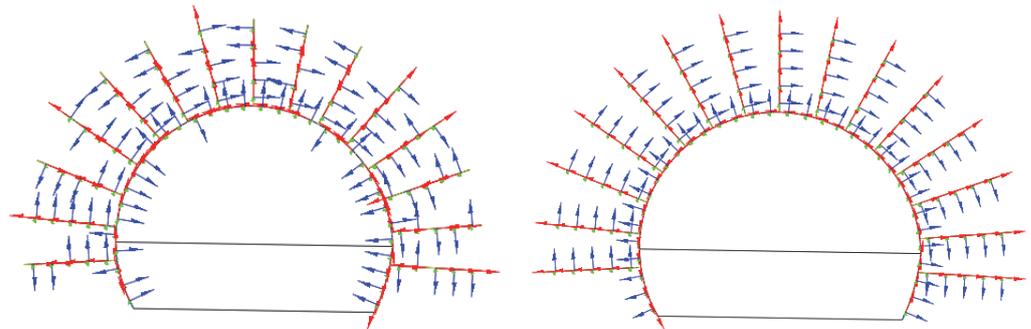
요소좌표계를 설정하는 과정입니다. Beam/Truss 요소의 부재력은 요소좌표계(Element Coordinate System)를 기준으로 출력됩니다. 요소좌표계는 요소 생성순서와 방향에 따라 결정되기 때문에 일관성 있는 부재력을 출력하기 위해서는 요소를 생성할 때 요소좌표계를 고려하여 모델링 하여야 합니다.

- 작업트리 > 요소망에서 상부 sc, 하부 sc, 상부 rb, 하부 rb 를 선택합니다.
- 마우스 우클릭 > 컨텍스트 메뉴에서 표시 > 요소좌표계를 체크합니다.
- 요소망 > 요소 > 요소파라미터 > 1D 탭의 Dropdown 메뉴에서 좌표계변경을 선택합니다.
- 방향이 다른 요소들은 방향뒤집기(X-축)을 이용하여 동일한 방향을 가지도록 설정합니다.

▶ 요소파라미터 - 좌표계변경



▶ 요소좌표계 정렬 전
▶▶ 요소좌표계 정렬 후





Section 5

해석설정

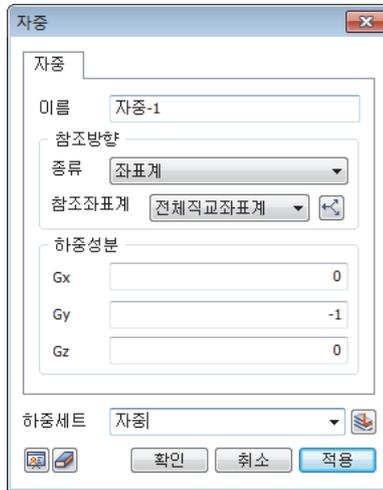
5.1 하중조건 설정

*  : 정적/사면해석 > 하중 > 자중 (Static/Slope Analysis > Load > Self Weight)

자중을 설정하는 과정입니다. 지반, 구조부재에 입력된 단위중량과 자동설정된 중력가속도에 곱해져 자동계산됩니다. 방향에 따른 스케일 팩터를 입력하여 간단히 설정할 수 있으며, 중력방향에 대한 기본값이 설정되어 있습니다.

- 이름을 자중-1, 하중세트에 self weight 를 입력합니다.
- 하중성분은 중력가속도 방향 Gy 에 scale factor 인 -1 을 입력합니다.
- [적용] 버튼을 누릅니다.

▶ 자중 설정



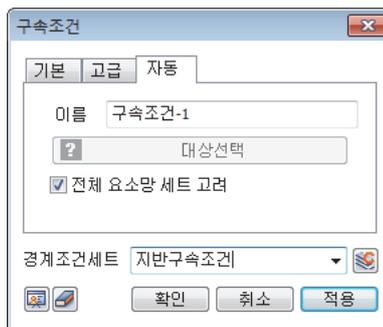
5.2 경계조건 설정

*  : 정적/사면해석 > 경계조건 > 구속조건 (Static/Slope Analysis > Boundary > Constraint)

전체좌표계 기준으로 모델 내 변위 또는 회전에 대한 구속조건을 설정하는 과정입니다. 전체좌표계 방향에 따라 좌/우/하단 부에 변위구속을 자동설정 합니다.

- 자동 탭에서 다음 그림과 같이 이름과 경계조건 세트명을 입력합니다.

▶ 경계조건 설정



Tip

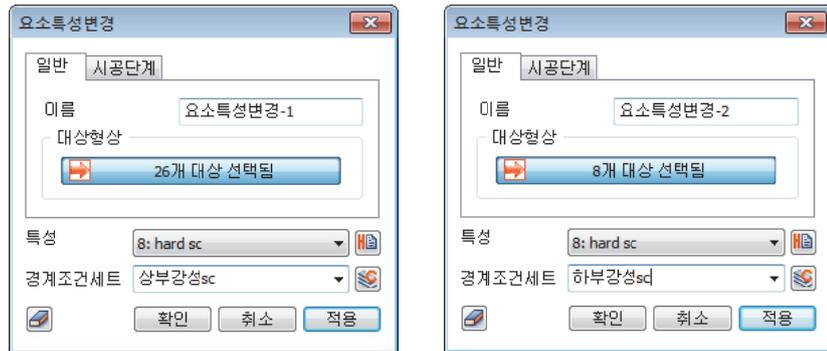
2 차원 해석에서는 좌/우측에 대해서는 수평방향, 하부에 대해서는 수평방향과 연직방향에 대한 변위를 구속합니다. GTS NX 에서는 자동으로 모델의 외곽영역을 판단하여, 경계조건을 생성해 줍니다.

*** [아이콘] : 정적/사면해석 > 경계조건 > 요소특성변경 (Static/Slope Analysis > Boundary > Change Property)**

Shotcrete 의 경우 시공단계에 따라 강성이 연성 -> 강성으로 변화됩니다. 이를 모사하기 위해 요소특성변경을 이용합니다.

- 이름을 요소특성변경-1, 경계조건세트를 상부강성 sc 로 입력합니다.
- 상부 sc 요소망을 대상으로 선택합니다.
- 변경될 특성인 hard sc 를 지정합니다.
- [적용] 버튼을 누릅니다.
- 같은 방법으로 하부강성 sc 경계조건을 생성합니다.

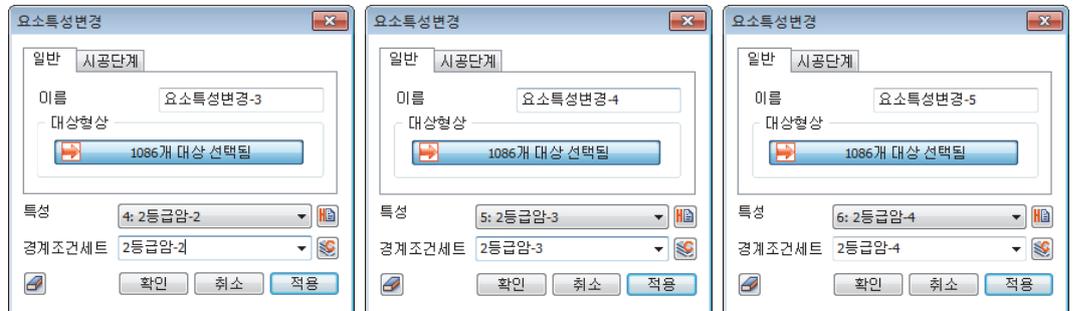
- ▶ 상부 Shotcrete 경화경계 조건 설정
- ▶▶ 하부 Shotcrete 경화경계 조건 설정



2 등급암의 K0 변화에 따른 결과를 분석하기 위해 요소특성변경을 정의합니다.

- 이름을 요소특성변경-3, 경계조건세트를 2 등급암-2 으로 입력합니다.
- 2 등급암, 터널상부, 터널하부 요소망을 대상으로 선택합니다.
- 변경될 특성인 2 등급암-2 를 지정합니다.
- [적용] 버튼을 누릅니다.
- 같은 방법으로 2 등급암-3, 2 등급암-4 의 경계조건을 생성합니다.

- ▶ 지반 물성 변경(K0=1.0)
- ▶▶ 지반 물성 변경(K0=1.5)
- ▶▶▶ 지반 물성 변경(K0=2.0)





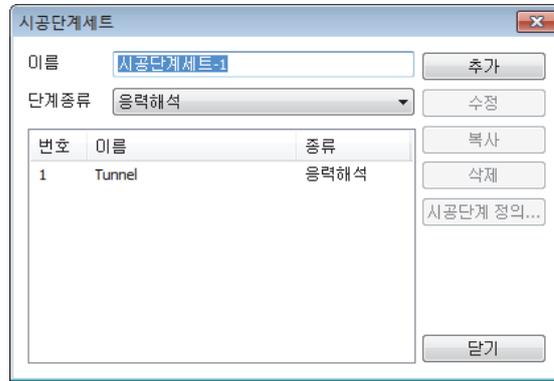
5.3 시공단계 정의

*  : 정적/사면해석 > 시공단계 > 시공단계세트 (Static/Slope Analysis > Construction Stage > Stage Set)

단계별 결과확인을 위해 시공단계를 구성하는 과정입니다. 초기 원지반 응력상태로부터 터널 굴착, 지보재(shocrete 및 rockbolt 설치), 지보재 경화 등 단계별 지반과 구조물의 요소망 및 하중조건, 경계조건을 설정합니다. 설정할 시공단계에 따라 요소망세트는 미리 분리되어 있어야 합니다.

- 이름에 Tunnel 을 입력합니다.
- 단계종류를 [응력해석]으로 지정한 후 [추가]버튼을 눌러 생성합니다.

▶ 시공단계 세트 생성



- [시공단계정의]를 클릭하여 시공단계를 생성합니다.
- 시공단계구성은 아래와 같습니다.

1 단계 - 이름 : 원지반

활성화데이터요소 : [실트질모래], [터널상부], [터널하부], [풍화암], [2 등급암]

활성화데이터 구속조건 : [지반구속조건]

활성화데이터 정적하중 : [자중]

2 단계 - 이름 : null stage

[변위초기화]를 체크합니다.

일반적인 시공단계 해석 과정에서 자중에 의한 해석을 통해 얻어지는 응력상태를 초기응력 상태로 설정합니다. GTS NX에서는 초기 응력을 K0 방법이나 자중 해석 방법을 사용하여 계산할 수 있습니다.

➤ K0 방법

$K0 = \sigma_h / \sigma_v$ 인 상수 K0 값을 이용하여 수직응력으로부터 수평응력을 계산하여 초기응력으로 설정하는 방식입니다. 이 방식을 사용하면 먼저 자중 해석에 의해 수직응력 σ_v 를 구하고, 그 값으로부터 $\sigma_h = K0 \times \sigma_v$ 에 의해 수평응력을 구합니다. 이 때 전단응력은 0으로 가정됩니다. 지면이 수평이 아닌 경우에는 이상과 같이 구한 응력상태는 자중과 평형을 이루지 못합니다. 따라서 지면이 수평이 아닌 경우에 K0 방법을 사용하여 초기 응력을 계산할 때는, 평형상태를 이루기 위해 자중과 위에서 계산된 응력상태에 의해 내력간의 불평형력을 사용하여 해석을 수행해야 합니다. 이 단계는 사용자가 아무 조건이 변하지 않는 NULL Stage 를 도입함으로써 수행될 수 있습니다.

➤ 자중 해석 방법

지면이 수평일 때, 이 방식은 $K0 = \nu / (1 - \nu)$ 인 K0 방법과 동일합니다. 하지만, 그렇지 않은 경우에는 수평방향의 변형률이 존재하게 되므로, K0 방법과는 다른 결과를 도출하고, 전단응력도 발생하게 됩니다. 따라서 일반적으로 지반이 사면인 경우에는 자중 해석 방법으로 해석하는 것이

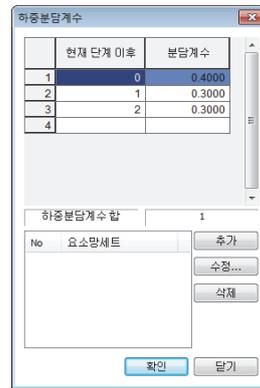
좋습니다. 다만, 이때는 1 보다 큰 K0 값을 설정하여 사용하는 것이 불가능하며, 큰 K0 값을 사용하고자 하는 경우에는 K0 방법을 사용해야 합니다.

3 단계 - 이름 : 상부굴착

비활성화데이터 요소망 : [터널상부]

굴착으로 인해 발생하는 Unbalance Force 가 한 번의 시공단계에서 모두 재하되지 않도록 하기 위해서 LDF(Load Distribution Factor)를 사용합니다.

[LDF]를 체크하고, 분담계수는 0.4, 0.3, 0.3으로 입력합니다.



Tip

터널 굴착 시공 중 막장 근처에서는 3 차원적 구조가 형성되며 이에 따라 종방향 및 횡방향 하중전이 현상(Arching effect)이 발생하게 됩니다. 이러한 두 개 이상의 평면안에서 발생하는 아칭현상은 지반하중을 3 차원적으로 분산시켜 터널주변과 막장 전면에서도 변위가 발생합니다. 이러한 효과를 수치해석에서 고려하기 위해서는 직접적으로 3 차원 유한요소 해석을 실시하여야 하나 최근의 문헌 및 연구조사, 시공계측 결과로부터 2 차원 해석으로도 3 차원 터널 진행효과를 충분히 반영할 수 있다는 것이 입증되었으며, 일반적으로 적용되고 있는 막장진행 및 지보재 설치에 의한 지반의 3 차원 거동효과를 LDF(하중분담율)을 설정하여 모형화하고 있습니다. LDF 는 시공단계에서 터널 굴착 효과를 굴착시공단계 이후의 몇 단계에 걸쳐 나누어 발현될 수 있도록 해주는 역할을 합니다. 굴착효과의 발현은 터널 굴착부가 없어지면서 터널을 수축시키는 힘을 0~1 까지의 비율로 작용시키며, 그 합은 반드시 1 이 되어야만 합니다. 또한 시공단계 중 LDF 가 서로 중복되지 않도록 설정하셔야 합니다.

4 단계 - 이름 : 상부지보

활성화데이터 요소망 : [상부 sc], [상부 rb]

5 단계 - 이름 : 상부지보경화

활성화데이터 구속조건 : [상부강성 sc]

6 단계 - 이름 : 하부굴착

[LDF]를 체크하고, 분담계수는 0.4, 0.3, 0.3으로 입력합니다.

비활성화데이터 요소망 : [터널하부]

7 단계 - 이름 : 하부지보

활성화데이터 요소망 : [하부 sc], [하부 rb]

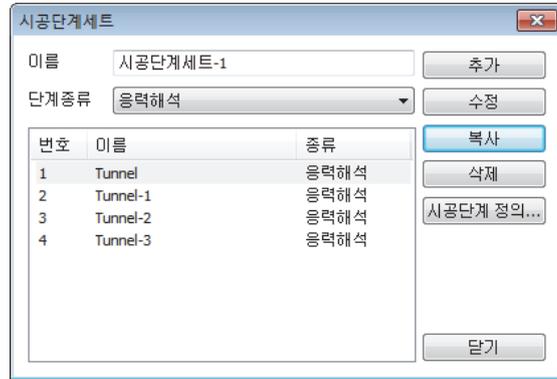
8 단계 - 이름 : 하부지보경화

활성화데이터 구속조건 : [하부강성 sc]



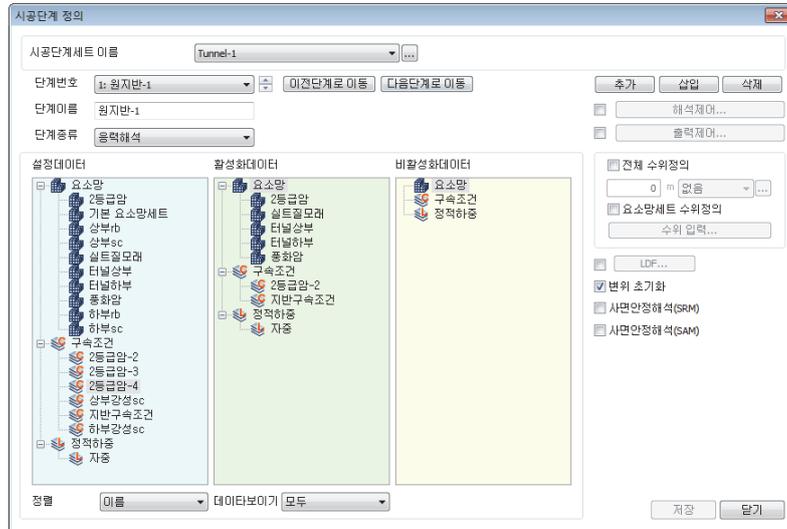
- 2 등급암, K0 변화에 따른 영향 검토를 위해 K0=1.0, 1.5, 2.0 의 시공단계를 추가로 생성합니다.
- [Tunnel], 응력해석을 선택 후 복사합니다.

▶ 시공단계 세트 생성



- Tunnel-1 의 시공단계에서 초기단계에 2 등급암의 K0=0.5 → 1.0 으로의 속성변경경계조건인 [2 등급암-2]를 활성화데이터란으로 옮깁니다.
- 같은 방법으로 Tunnel-2, Tunnel-3 에서도 초기단계에 속성변경경계조건인 [2 등급암-3], [2 등급암-4]를 각각 활성화데이터란으로 옮깁니다.

▶ 시공단계 정의



5.4 해석케이스 설정

*  : 해석 > 해석케이스 > 추가 (Analysis > Analysis Case > General)

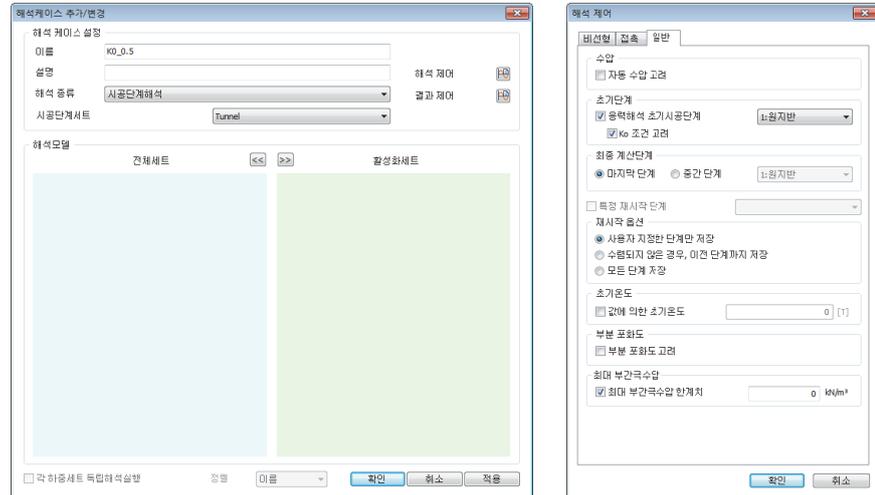
해석법과 해석에 사용할 모델 데이터를 설정하는 과정입니다. 고급 옵션으로 해석 및 출력결과 타입을 제어할 수 있습니다. 시공단계 해석의 경우 단계별로 이미 해석에 사용할 데이터를 설정하였기 때문에 해석모델 설정부분은 비활성화 됩니다.

- 이름을 K0_0.5 로 입력합니다.
- 해석종류를 시공단계, 시공단계세트를 Tunnel 로 설정합니다.
- 해석제어 > 일반에서 응력해석 초기시공단계를 체크하여 1:원지반으로 지정하고, K0 조건고려에 체크합니다.



- 같은 방법으로 K0=1.0, 1.5, 2.0 에 대한 해석케이스를 생성합니다. (시공단계세트설정에서 Tunnel-1, Tunnel-2, Tunnel-3 으로 각각 변경하고, 응력해석 초기시공단계를 원지반 단계로 설정합니다.)

- ▶ 해석케이스 생성
- ▶ 해석제어 옵션



5.5 해석수행

* : 해석 > 해석 > 실행 (Analysis > Analysis > Perform)

해석을 수행합니다. 해석이 완료되면 후처리모드(결과확인)로 자동 전환되며, 이후 모델수정 및 옵션 변경을 위해서는 전처리모드로 전환해야 합니다.

- 해석수행관리자의 체크박스를 체크하여 수행하고자 하는 케이스만 해석을 수행할 수 있습니다.

- ▶ 해석수행 관리자



Tip

해석 과정에서 발생하는 정보는 Output Window 에 표시가 됩니다. 특히 Warning 등이 발생한 경우에는 해석 결과가 정상이 아닐 수도 있으므로 주의해야 합니다.
 해석을 수행하기 전에 모델이 자동으로 저장됩니다. 해석에 대한 정보는 Text 파일 포맷으로 Save 파일과 동일한 폴더에 *.OUT 파일에 저장됩니다.
 해석시 출력결과는 해석 > 해석케이스 > 추가 > 결과제어 항목에서 제어할 수 있으며, 출력 옵션을 바이너리/텍스트로 설정하는 경우에는 해석 후 절점 및 요소 결과가 *.OUT 파일에 함께 출력됩니다.



Section 6 결과분석

해석이후 각 시공단계별 변형, 응력, 부재력 등을 결과트리에서 확인할 수 있습니다. 모든 결과는 컨투어, 테이블로 제공됩니다. 본 예제에서 분석할 주요 결과항목은 다음과 같습니다.

- 터널의 변위 - 천단변위, 내공변위
- Shotcrete 의 발생부재력 및 발생응력
- Rockbolt 의 축력

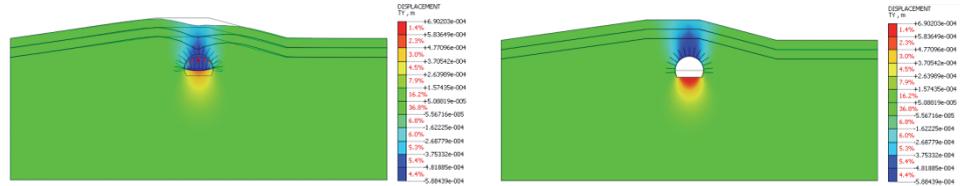
6.1 변위확인

변위 경향은 결과트리의 Displacement 로 확인이 가능합니다. TX, TY, TZ 는 전체좌표계 기준으로 X, Y, Z 방향을 의미합니다. 따라서 터널의 천단변위는 TY TRANSLATION 으로 확인할 수 있으며, 터널의 내공변위는 TX TRANSLATION 으로 확인합니다.

(V) 항목은 컨투어 및 벡터가 동시에 표현가능한 결과항목을 의미하며, GTS NX 에서는 변위 및 주응력에 대해서 컨투어/벡터 동시표현이 가능합니다.

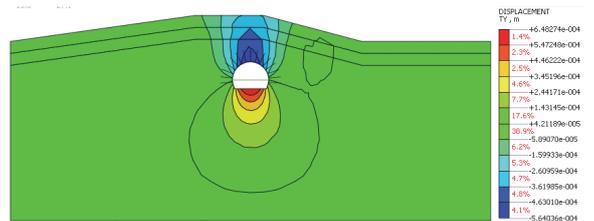
- 작업트리 > 결과 > K0_0.5 에서 결과를 확인할 단계(하부지보경화)를 지정한 후 Displacement > TY TRANSLATION(V)를 선택합니다.
- 결과분석 > 일반 > 변형형상 > 변형 전 형상으로 선택합니다.

- ▶ 변형 후 형상
- ▶▶ 변형 전 형상



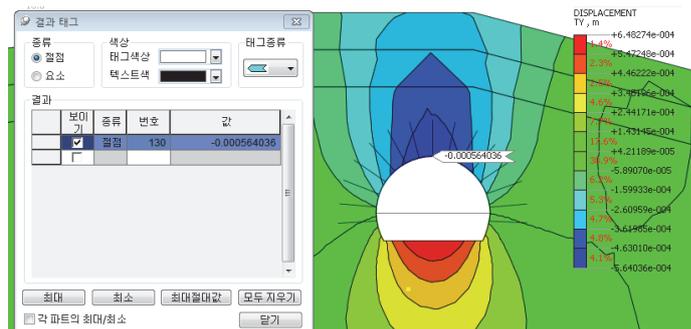
- 결과분석 > 일반 > 컨투어유형 > 불연속으로 선택합니다. 좌측 하단의 속성창에서 컨투어선을 보이기로 설정하시면 경향 파악이 용이합니다.

- ▶ 속성창 > 컨투어
- ▶▶ 불연속+컨투어선 보이기



- 결과분석 > 고급 > 결과값태그를 선택하여 보고자 하는 절점을 선택하여 해당 절점에서의 결과값을 확인합니다.

- ▶ 결과값태그



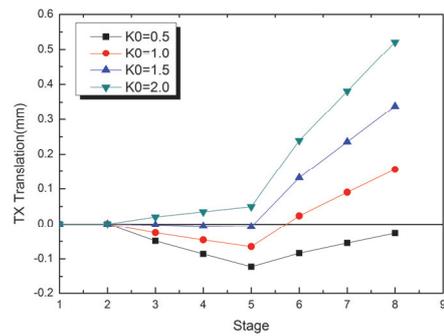
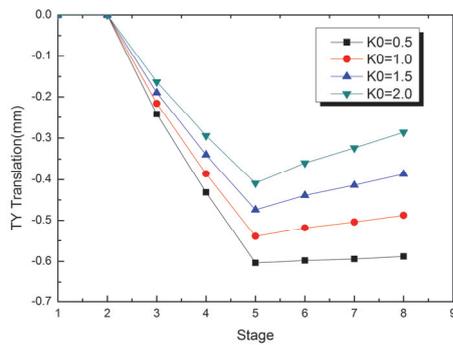
- 결과 단위계는 우측 하단의 단위변환기를 통해 실시간으로 변환할 수 있습니다.
- 작업화면 하단의 이동바를 이동하여 단계별 결과항목을 확인합니다.



- 결과분석 > 고급 > 결과추출을 통해 해석케이스별 특정 요소나 절점의 결과값을 추출합니다. 결과값은 테이블 형식으로 출력되며, 해당 테이블은 MS-EXCEL 에 복사/붙여넣기로 활용할 수 있습니다.

▶ 결과값 추출
▶▶ 추출된 결과값

번호	스텝	스텝 값	절점: 130 (m)
1	원지반:INCR=1 (LOAD=1.000)	1.000000e+000	0.000000e+000
2	null stage:INCR=1 (LOAD=1.000)	1.000000e+000	0.000000e+000
3	상부굴착:INCR=1 (LOAD=1.000)	1.000000e+000	-2.313151e-004
4	상부지반:INCR=1 (LOAD=1.000)	1.000000e+000	-4.126937e-004
5	상부지반경화:INCR=1 (LOAD=1.0)	1.000000e+000	-5.772872e-004
6	하부굴착:INCR=1 (LOAD=1.000)	1.000000e+000	-5.721121e-004
7	하부지반:INCR=1 (LOAD=1.000)	1.000000e+000	-5.692298e-004
8	하부지반경화:INCR=1 (LOAD=1.0)	1.000000e+000	-5.640363e-004



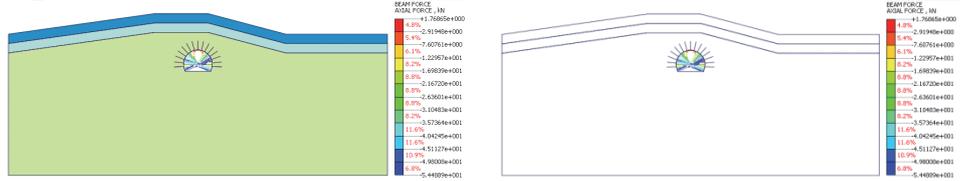


6.2 슛크리트 발생부재력 및 발생응력

스�크리트는 Beam 요소로 모델링하였으며, Beam 요소의 경우 축력, 전단력, 모멘트가 출력됩니다.

- 작업트리 > 결과 > K0_0.5 에서 결과를 확인할 단계(하부지보경화)를 지정한 후 Beam Element Forces > AXIAL FORCE 를 선택합니다.
- 결과분석 > 일반 > 결과없는 엔티티 > 제외 로 설정합니다.

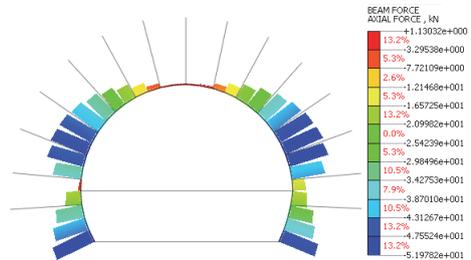
- ▶ 축력(AXIAL FORCE)
- ▶▶ 결과없는 엔티티 > 제외



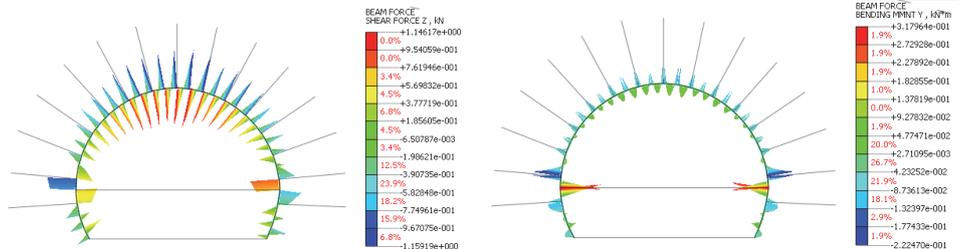
- 좌측 하단의 속성창 > 다이어그램을 통해 다이어그램의 스케일/종류/채우기 타입/샘플 개수 등을 지정할 수 있습니다.

- ▶ 속성창(다이어그램)
- ▶▶ 면채우기 + 반전

속성창	
다이어그램	
다이어그램	□
스케일 값	1
선두께	2
다이어그램 종류	컨투어
채우기 타입	선채우기
다이어그램 색상	000080
반전	False
참조값	False
참조값	0
결과 방향	기본값
샘플개수	8
절단면 다이어그램	
스케일 값	1
최소/최대	True
지수포맷	True
소수점이하자리	2
값 색상	000000
다이어그램 색상	F10031
적용	



- 작업트리 > 결과 > K0_0.5 에서 결과를 확인할 단계(하부지보경화)를 지정한 후 Beam Element Forces > SHEAR FORCE Z 와 BENDING MOMENT Y 를 선택하여, 전단력과 모멘트를 확인합니다.

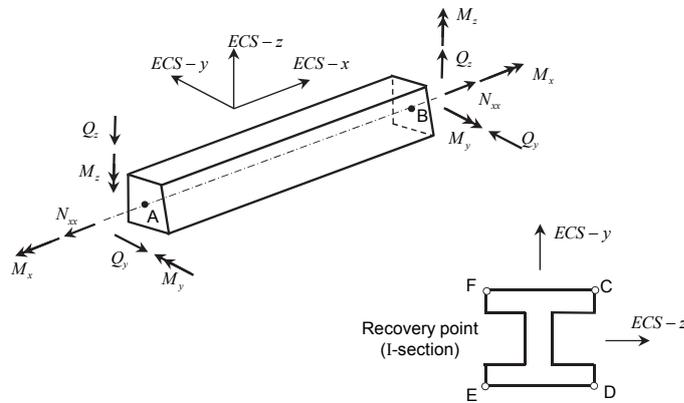




Beam 요소에서 출력되는 응력결과 항목은 아래표와 같습니다.

결과 항목	설명
Axial stress	위치 : 각 세그먼트의 A-B 단 σ_{xx}
Torsional stress	위치 : 각 세그먼트의 A-B 단 비틀림 응력 계수 c 로부터 계산 ($\tau = Tc / J$)
Shear stress	위치 : 각 세그먼트의 A-B 단 전단 단면적 계수와 단면적으로 부터 계산 $\tau_{xy} = Q_y / (S_{by} A)$, $\tau_{xz} = Q_z / (S_{bz} A)$
Point stress	위치 : 각 세그먼트의 A-B 단 사용자 지정 위치(C,D,E,F)에서 굽힘에 의한 응력 σ_{xx}
Max/Min stress	위치 : 각 세그먼트의 A-B 단 C~F 위치 중 Axial stress와 Point stress 합 최대/최소
Von-mises stress	위치 : 각 세그먼트의 A-B 단 $\sigma_v = \sqrt{\sigma_{xx}^2 + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2)}$

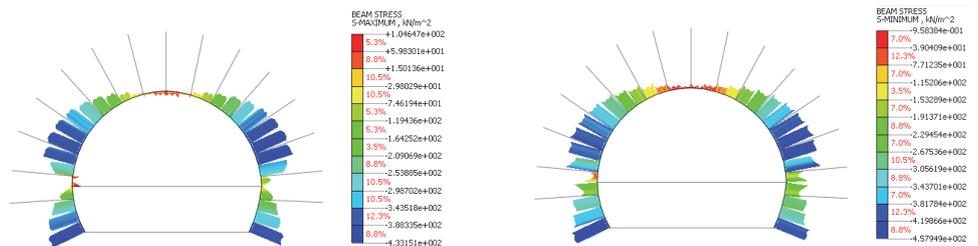
▶ Beam 요소의 결과출력 위치와 방향



GTS NX 에서 부호의 규약은 (+)는 인장, (-)는 압축을 의미합니다. 터널해석에서는 Shotcrete 의 휨압축응력이 허용치를 만족하는지를 확인하고 있습니다. 따라서, 휨압축응력을 확인하기 위해선 Beam Element Stresses > S-MIN, S-MAX 항목의 (-) 최대값을 확인합니다.

- 작업트리 > 결과 > K0_0,5 에서 결과를 확인할 단계(하부지보경화)를 지정한 후 Beam Element Stresses > S-MIN 을 선택하여, 휨압축응력을 검토합니다.

▶ 조합응력(min)
▶ 조합응력(max)



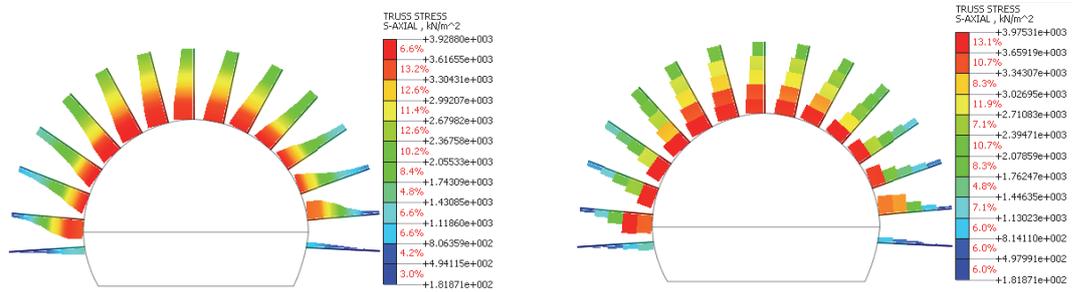


6.3 락볼트 발생축력

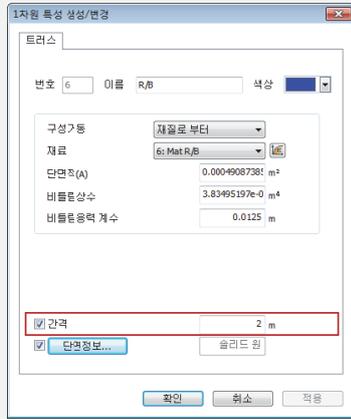
락볼트는 Truss 요소로 모델링하였으며, Truss 요소의 경우 축력이 출력됩니다.

- 작업트리 > 결과 > K0_0.5 에서 결과를 확인할 단계(하부지보경화)를 지정한 후 Truss Element Forces > AXIAL FORCE 을 선택하여, 축력을 검토합니다.
- 결과분석 > 보이기/감추기 > 절점평균을 체크해제합니다. 절점평균은 컨투어나 다이어그램을 smooth 하게 보이기 위해 인접한 절점의 결과를 평균하여 출력하는 옵션입니다.

- ▶ 절점평균 체크시
- ▶ 절점평균 체크 해제시



2 차원 해석에서는 1D 요소에 대해 부재간 거리값인 CTC(spacing)를 [정적/사면해석 > 특성/좌표계/함수 > 특성] 창에서 입력받고 있습니다.



GTS NX에서는 부재력 출력시 CTC가 곱해진 부재 개소당 축력값($f^* = nf$)으로 출력됩니다.