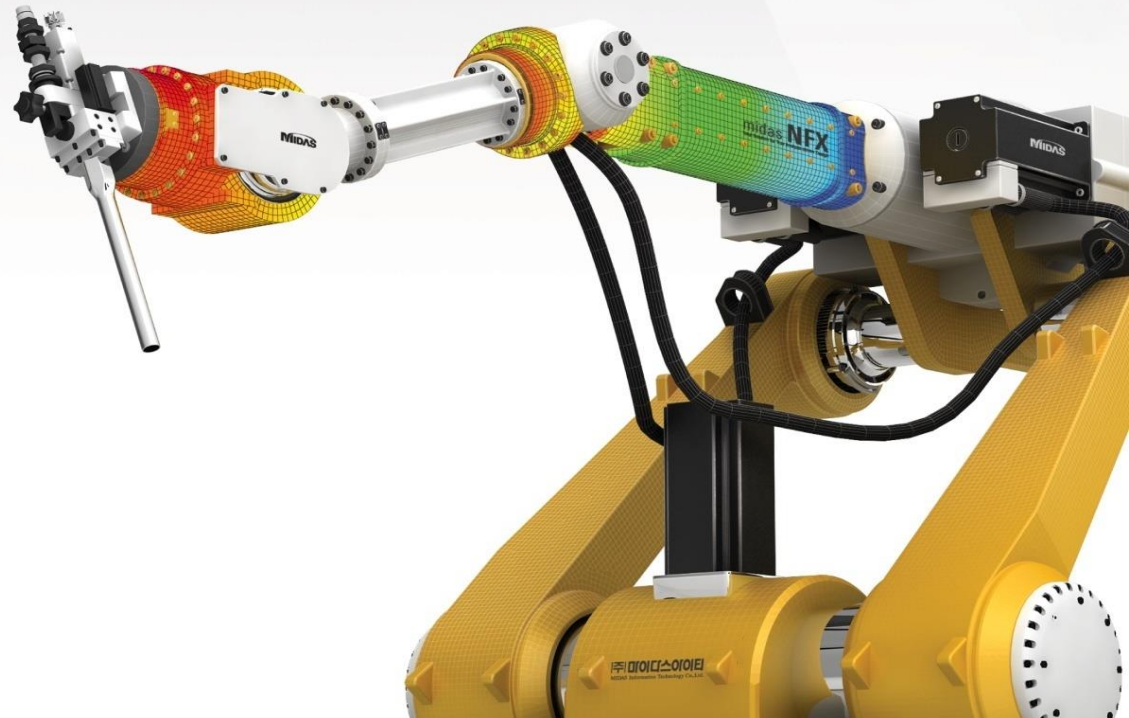


midas NFX 비선형해석 정기교육

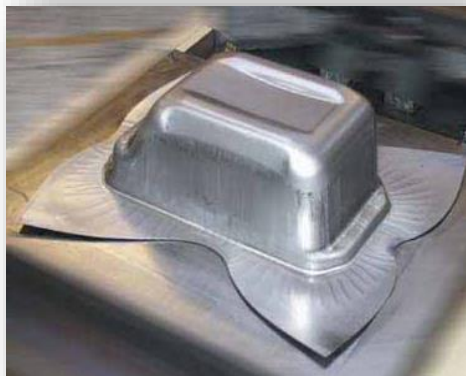


목차

1. 비선형 해석의 개요
2. 비선형 해석 절차 및 옵션소개
3. 기하 비선형
4. 재료 비선형(1)-탄소성
5. 재료 비선형(2)-초탄성
6. 접촉 비선형
7. 비선형 해석을 위한 방법론

비선형 해석 개요

실제 물리현상은 대부분 비선형



- 비선형성이 무시할 정도로 작은 경우 선형으로 가정하여 해석 (효율적)
- 비선형성을 무시할 수 없을 경우 비선형 해석을 수행 ➡ 비선형성이란???

비선형의 세가지 요인



기하비선형



물체의 형상이 **과도한 변형**을 일으키거나 **하중의 방향**이 **변하는 경우**



재료비선형



물체의 응력-변형을 관계가 **탄성범위를 벗어나거나** **비선형적 탄성**을 나타내는 경우

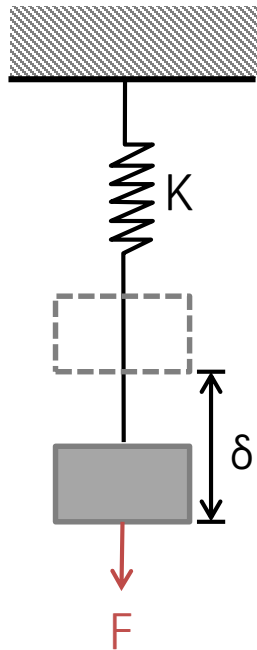


접촉비선형

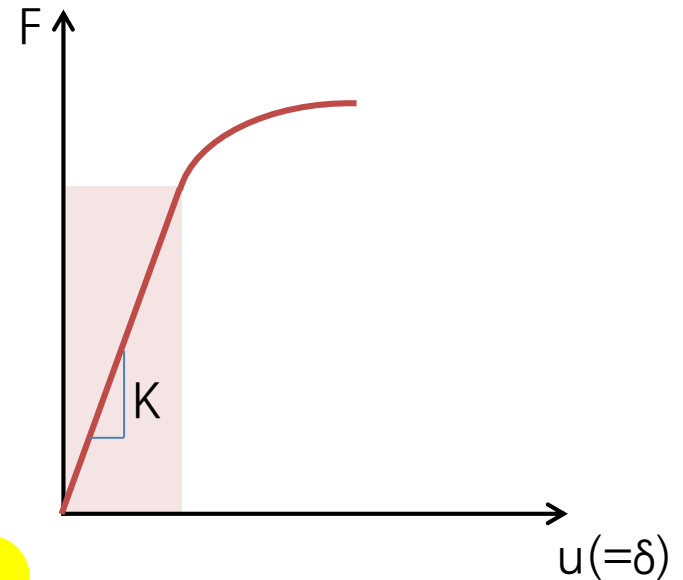


물체의 거동에 따라 물체의 **경계조건(접촉)**이 **바뀌는 경우**

선형 해석이란 무엇인가?



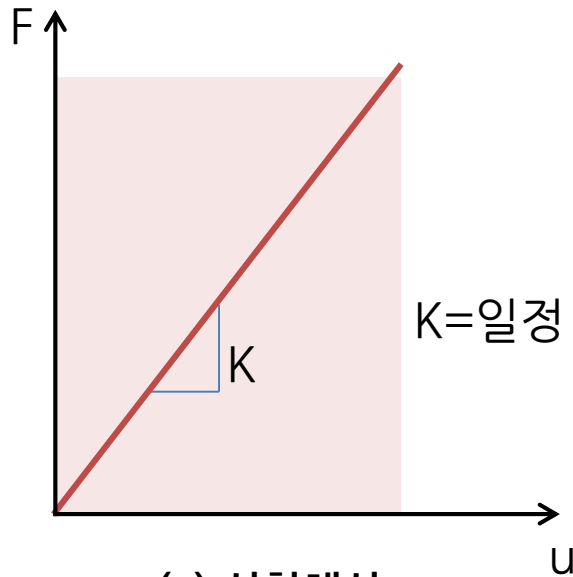
후크의 법칙에 의해
 선형 방정식으로 기술 $F=Ku$



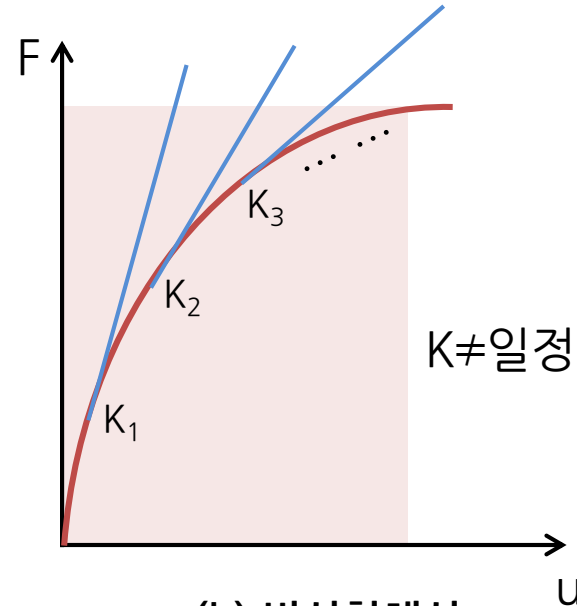
선형해석에서의 결과?
 1kgf의 힘을 주었을 때 1mm의 변위가 발생한다면
 10kgf의 힘을 주었을 때 10mm의 변위가 발생함
 즉, K는 일정하고 하중에 비례하여 결과가 나타나게 됨

- 강성이 일정한 경우 후크의 법칙에 의한 선형방정식을 사용할 수 있다.
- 대부분의 구조물은 강성이 일정하다고 가정하고 설계 → why??

비선형 해석이란 무엇인가?



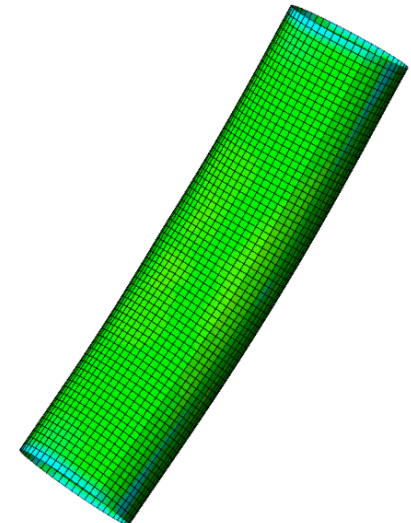
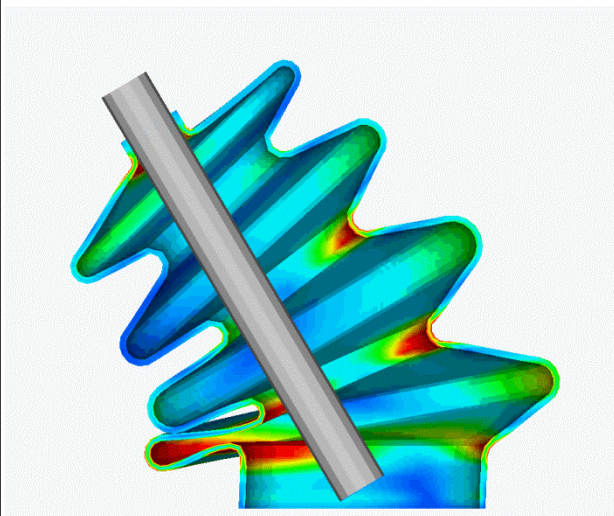
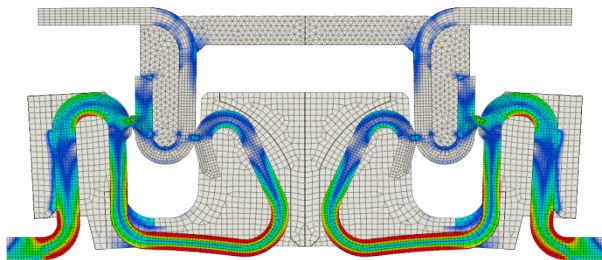
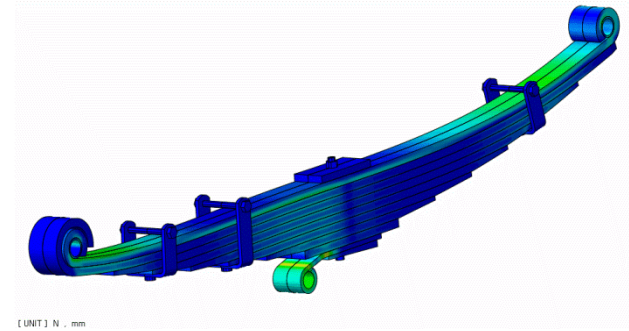
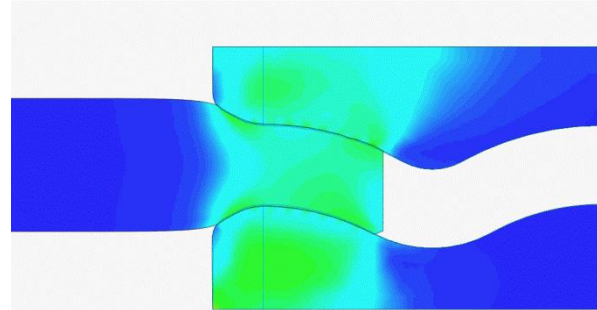
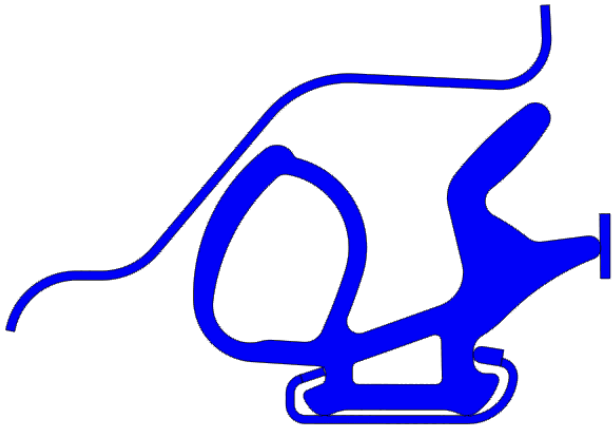
(a) 선형해석



(b) 비선형해석

- 하중의 크기가 변함에 따라 구조물의 강성이 바뀌게 되는 경우
- 하중-변위 관계가 비선형적인 함수로 표현됨
- 선형해석에서는 K 가 일정하므로 F 를 알면 u 를 구할 수 있다. 다시 말해 기울기만 안다면 물체의 거동을 단 한번의 계산으로 구할 수 있지만, 비선형 해석에서는 곡선 상의 기울기가 계속 변하므로 반복적인 계산을 통하여 K 를 계산하여 최종해를 구해야 한다.

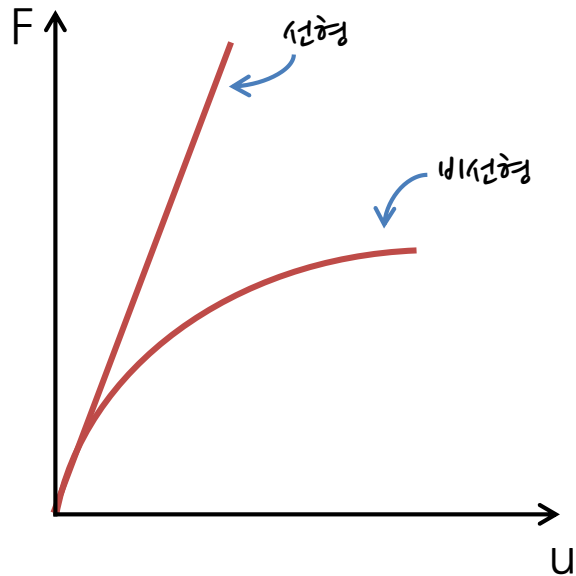
비선형 해석 사례



어떠한 경우에 비선형 해석이 요구되는가?

- ◆ 정확한 성능 데이터가 필요한 경우
- ◆ 접촉이 발생하는 위치가 바뀌는 경우
- ◆ 유연한 부품에서 대변형이 예상되는 경우
- ◆ 응력 수준이 항복점에 근접한 경우
- ◆ 정확한 좌굴 하중을 파악하기 위해
- ◆ 비정상적으로 큰 변형이 관찰되는 경우
- ◆ 고무와 같은 초탄성재료를 사용하는 경우
- ◆ 일정한 하중이 오래 지속되었을 때 변형이 점차 증가하는 경우

비선형 해석의 수치해석 방법론



선형 해석

→ 선형해석에서는 $F=KU$ 방정식을 이용하여 주어진 하중에 대한 구조물의 응답을 구할 수 있다.

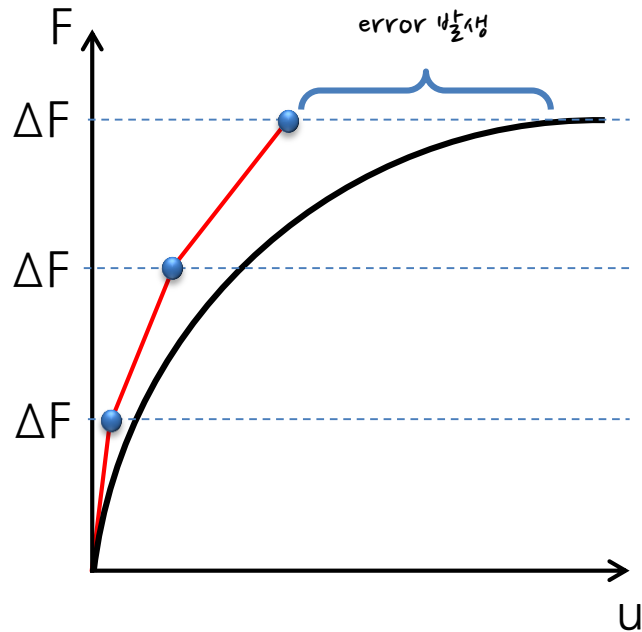
비선형 해석

→ $F \neq KU$ 이므로 선형방정식으로 해를 구할 수 가 없다.
 → 비선형의 경우는 하중을 여러 개의 구간으로 나누어 구간마다 $\Delta F = [K_x][\Delta U]$ 방정식으로 해를 구하게 된다.

✓ 즉, 비선형 해석에서는 주어진 하중을 여러 개의 구간으로 분할하고 각 구간에 대해서 반복적인 계산을 통해 해를 구해야 한다.

비선형 해석의 수치해석 방법론

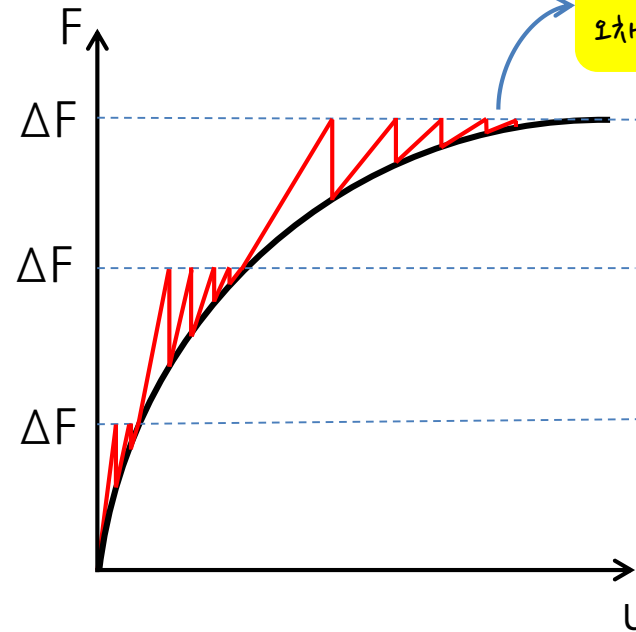
✓ 증분법



단점 보완

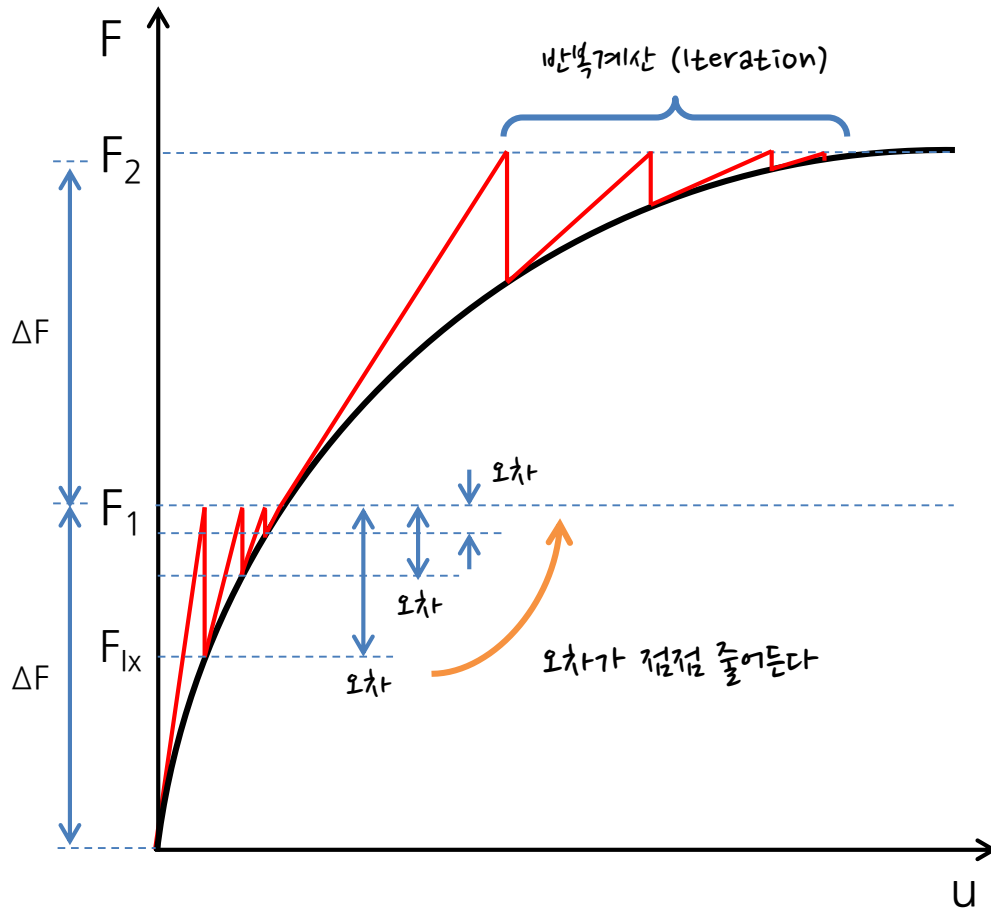
- 증분 구간마다 강성이 갱신된다.
- 하지만 매 구간마다 오차가 누적되며 마지막 결과는 매우 큰 오차를 발생시킨다.

✓ 뉴턴-랩슨법



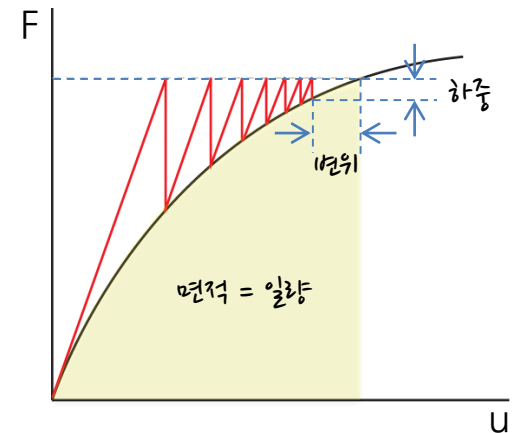
- 증분구간마다 강성이 갱신된다.
- 증분법에는 없는 강성의 반복 수정과정이 존재하기 때문에 오차가 누적되는 것을 해결할 수 있다.

뉴턴-랩슨법

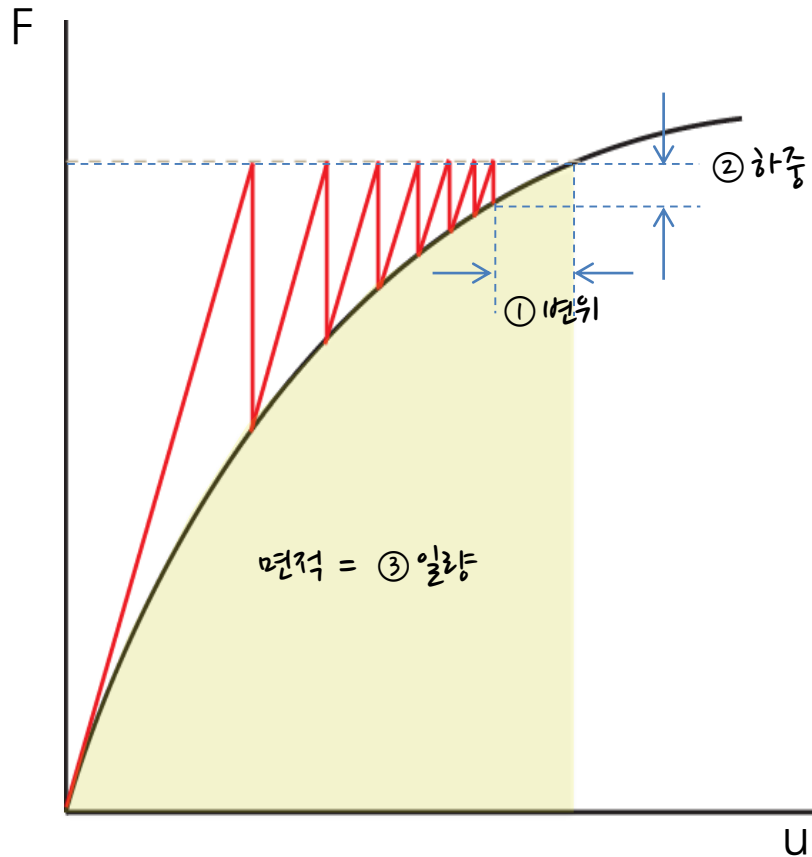


$$[K_T][\Delta U] = \{F_1\} - \{F_{ix}\}$$

- 선형해석에서 $F=KU$ 에서 $F_{(외력)} = F_{(내력)}$ 인 경우 해를 구할 수 있으며(수렴) $F=KU$ 를 만족한다.
 - 비선형해석에서는 $\{F_1\}-\{F_{ix}\}$ 가 설정된 오차범위 내에 도달하였을 때, 해를 구할 수 있으며 수렴되었다고 한다.
- ✓ 이러한 수렴기준은 하중, 변위, 일량 세 가지가 있다.



수렴기준

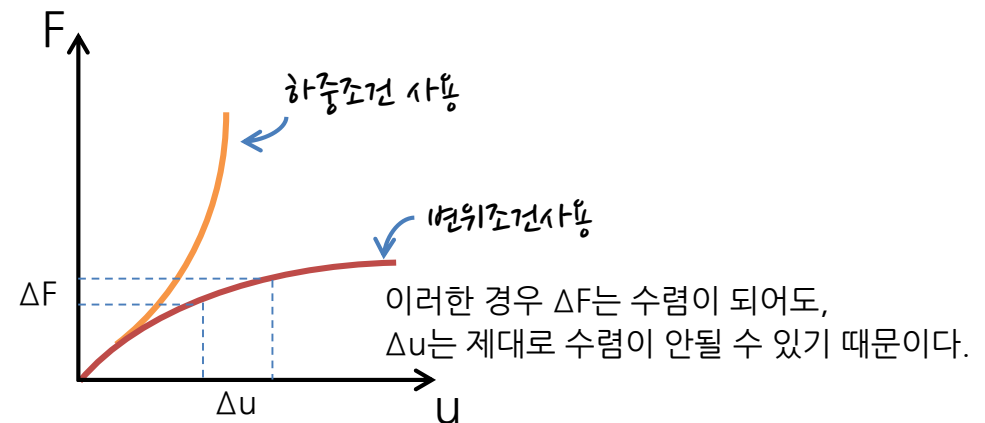


- 일반적으로 2개의 조건을 충족시켜야 합리적인 결과를 얻을 수 있다.

① 변위 + ③ 일량 or

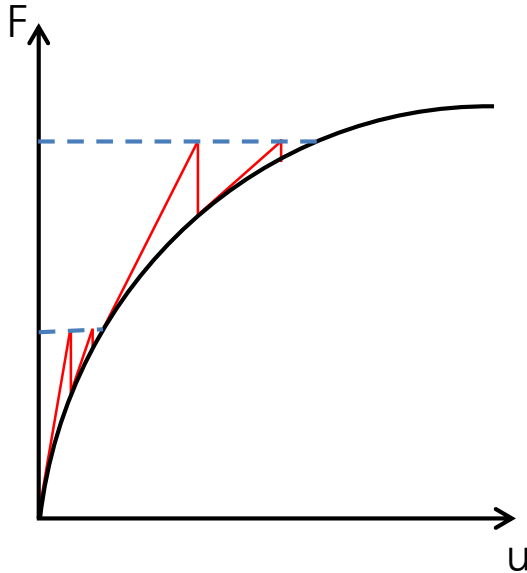
② 하중 + ③ 일량
(전통적으로 많이 사용되는 수렴조건)

- 하지만, 하중에 민감하지 않은 시스템에서는 변위 조건을 사용한다.



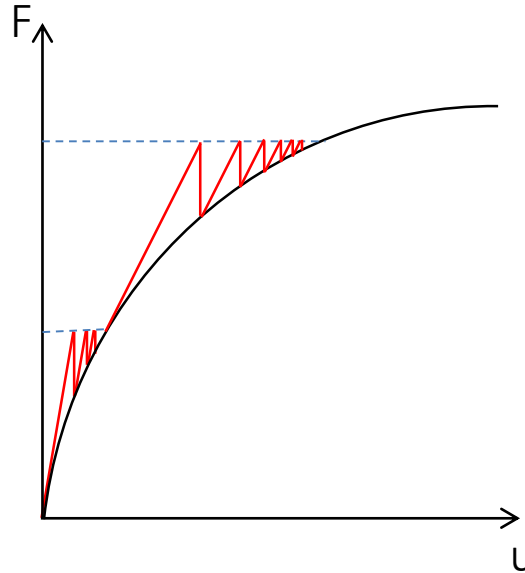
비선형 해석의 수치해석 방법론

✓ 뉴턴-랩슨법



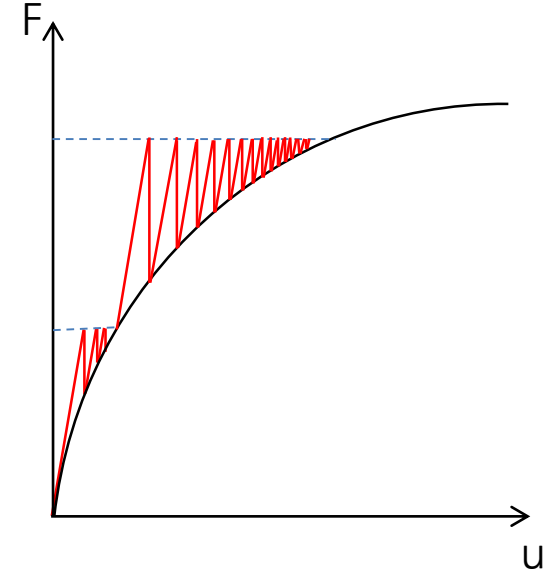
- 매번 강성을 최신화
- 강성을 계산하는데 시간이 걸림

✓ 수정 뉴턴-랩슨법



- 하중 증분마다 강성 최신화
- 반복횟수가 많아짐
- 수렴성의 문제가 없다면
뉴턴-랩슨법보다 빠른 계산속도

✓ 초기 강성법

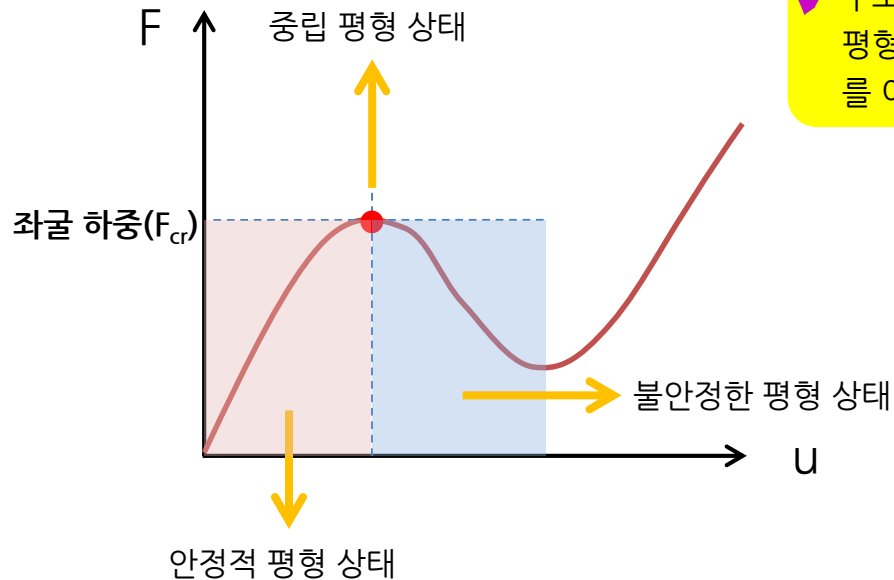
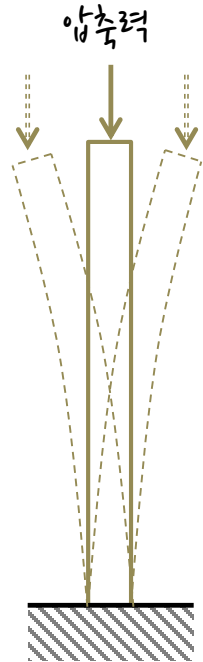


- 초기 계산된 강성을 유지
- 반복횟수가 많아짐
- 수렴성의 문제가 없다면
뉴턴-랩슨법보다 빠른 계산속도

✓ midas NFX에서는 접선강성의 재계산 시점을 정의함으로써 모든 반복법의 효과를 얻을 수 있다.

좌굴(Buckling)이란?

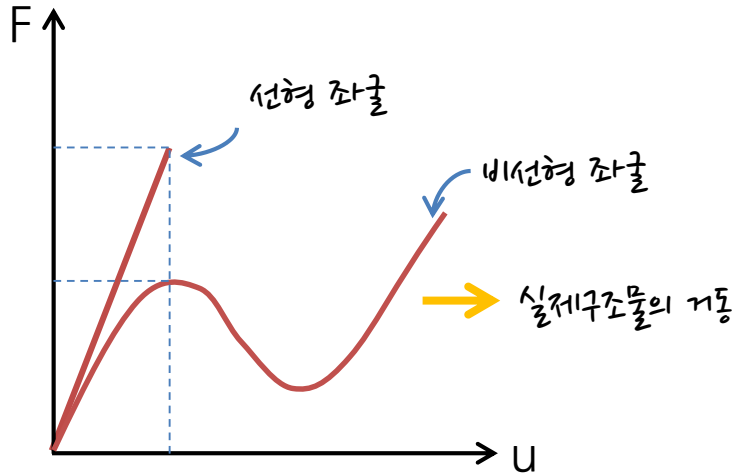
- 모든 구조물은 안정적인 평형상태에 있다.
- 임의의 하중이 주어졌을 때, 구조물이 불안정한 상태에 이르게 되며 큰 변형이 발생하는 것을 말한다.
- 이러한 불안정성은 재료의 강도에 무관하며, 구조물의 기하형상에 좌우된다.
- 좌굴 해석을 통해 구조물의 좌굴 하중(좌굴이 발생하는 임계하중)과 좌굴모드(좌굴발생시 변형형상)를 구할 수 있다.



✓ 구조물은 외력을 받을 때 단순히 외력=내력의 단순한 평형상태를 이루는 것이 아니라, 안정적인 평형상태를 이루고 있다고 한다.

선형 좌굴 해석 VS 비선형 좌굴해석?

선형 좌굴 VS 비선형 좌굴



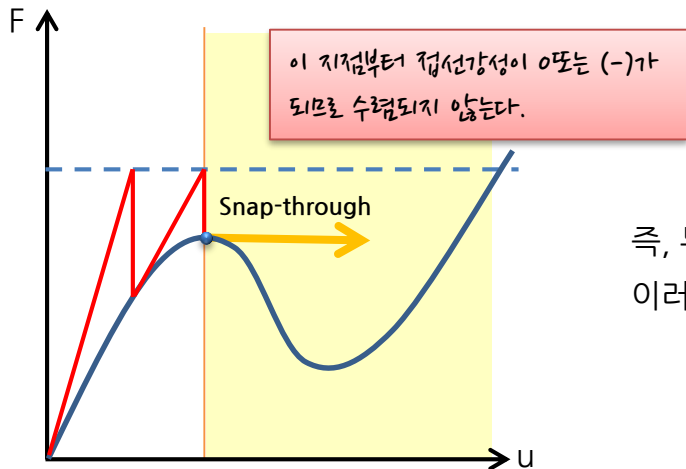
선형 좌굴해석의 한계

- 좌굴하중이 과도하게 평가되므로 위험이 발생할 수 있다.
- 좌굴 후 거동은 파악할 수 없다.
- 재료가 탄성이라고 가정하므로 재료의 비선형 거동은 고려가 되지 않는다.

비선형 좌굴해석의 장점

- 실제 좌굴 하중 값에 대한 계산이 가능하다.
- 재료의 비선형 거동까지 고려할 수 있다.

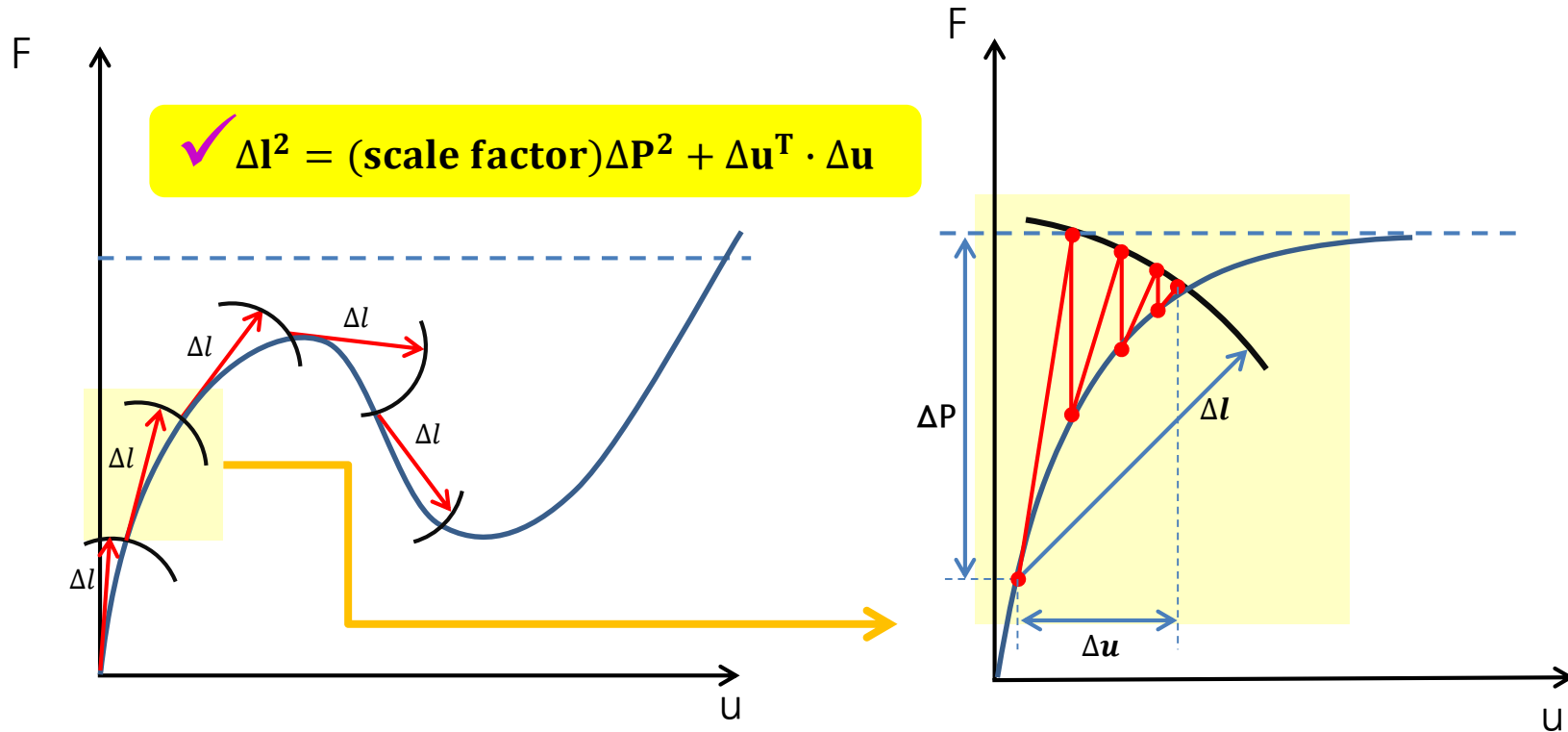
※ 비선형 좌굴의 경우



즉, 뉴턴-랩슨법을 이용해서는 좌굴 발생 이후의 거동을 파악하기가 어렵다. 이러한 경우에는 다른 기법을 사용해야만 해를 얻을 수 있다.

→ **호장법(Arc-length), 변위 제어 기법**

호장법(Arc-length)



- 강성이 “0”이 되거나 (-)를 갖는 구간의 해를 구할 수 있다.
- 일반적으로 snap-through 현상이 발생하는 비선형 좌굴해석에서 사용
- midas NFX에서는 Crisfield(CRIS), Riks(RIKS), Modified Riks(MRIKS)를 지원

호장법(Arc-length)

고급 비선형 파라미터

비선형 솔버 파라미터

기본 설정 사용

강성 변경 파라미터

강성 변경 방법 사용자 지정

사용자 지정 강성 갱신 방법 자동 (AUTO)

강성 갱신 이전 반복 계산 수 (ITER와 SEMI일때 적용) 5

해석 옵션

수렴 실패 시 해석 종료

하중 증분당 최대 반복계산 횟수 50

최대 하중분할 레벨 5

선 탐색 활성화

반복계산당 최대 선탐색 횟수 4

선탐색 허용오차 0.5

발산 허용 횟수 3

자동 증분크기 컨트롤 사용

초기증분 대비 최대 증분 크기 5

호장법

호장법(Arc-Length) 사용 호장법 파라미터...

확인 취소

Crisfield (CRIS)

Crisfield (CRIS)

Riks (RIKS)

Modified Riks (MRIKS)

호장법 매개변수(Arc-Length)

제한 유형 Crisfield (CRIS)

최대 증분 수 20

하중 기여도 인수 0

호 길이 조절 방법

최소 호장 조절비율 (증분사이) 0.25

최대 호장 조절비율 (증분사이) 4

최소 호장 조절비율 (전체) 0.05

최대 호장 조절비율 (전체) 20

반복수렴의 기대회수 12

뉴트법 호장법 자동 변환

자동 변환 강성 매개변수 0.3

확인 취소

- 최대 증분 수

→ 호장법의 경우 비선형성에 따라서 설정된 증분 수보다 빨리 수렴할 수도 있고 수렴을 못할 수도 있다. 이를 고려하여 증분 수를 충분하게 설정해야 한다.

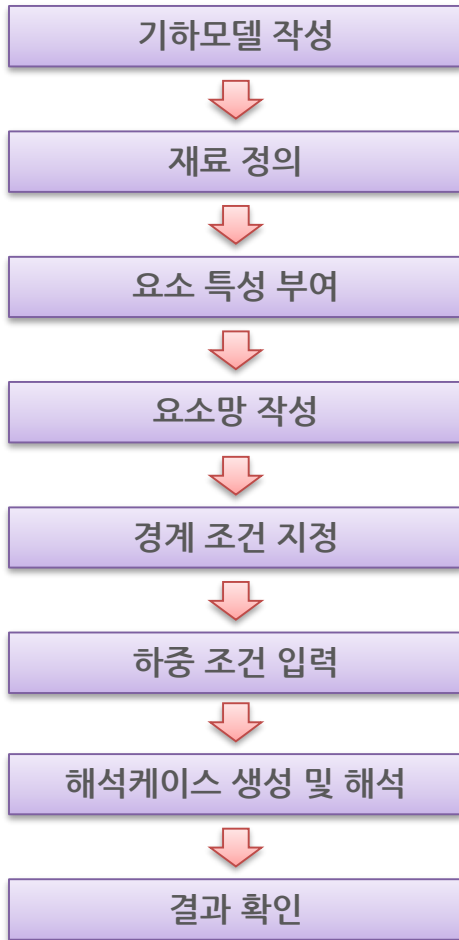
- 하중 기여도 인수

→ 하중 기여도 인수가 "1"인 경우에는 하중과 변위벡터 2개가 미지수이고 "0"인 경우에는 변위벡터만 미지수이다. 기본은 "0"으로 되어 있다.

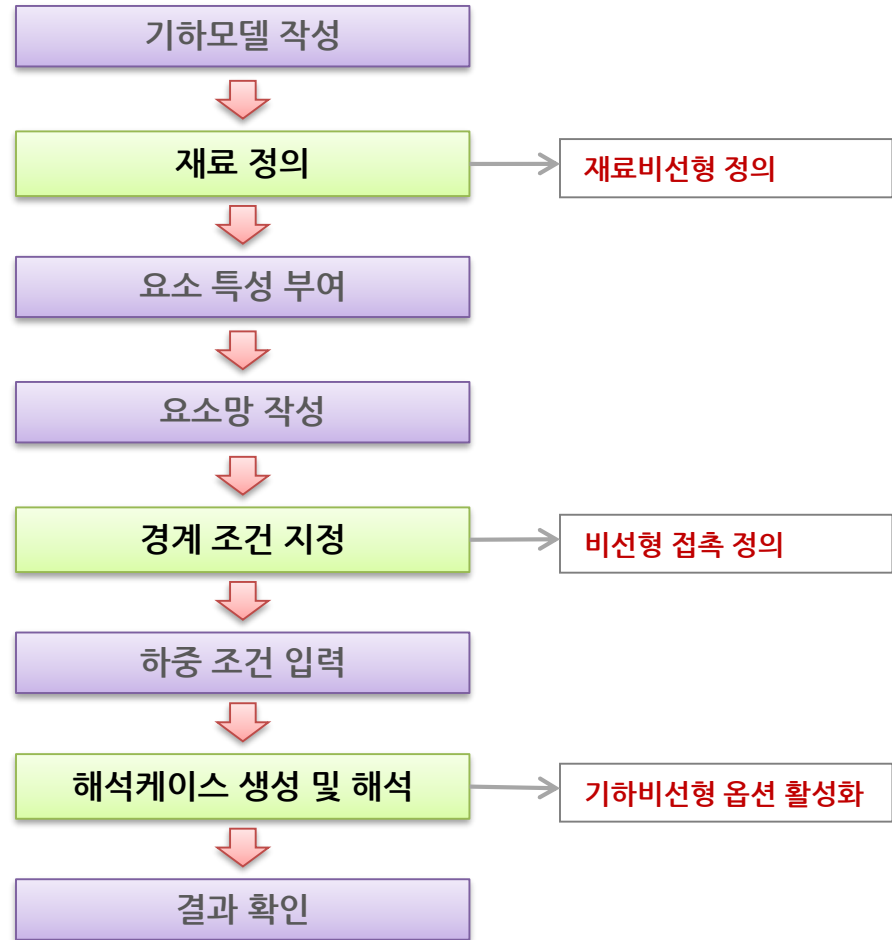
비선형 해석 절차 및 옵션 소개

해석 순서도

✓ 선형 해석 순서도



✓ 비선형 해석 순서도



✓ 선형 해석과 비선형 해석의 순서는 완전히 동일하므로 선형 해석에 먼저 익숙해져야 한다.

해석 옵션

비선형 해석에서는 선형 해석과는 달리 해를 구하기 위하여 여러 가지 방법을 사용하게 된다.

다음은 해석케이스를 정의한 후, 다양한 옵션을 정의하는 방법이며 각각에 대한 상세한 설명은 다음 장부터 있다.

1. 해석케이스 정의하는 방법

2. 기하비선형 고려하는 방법

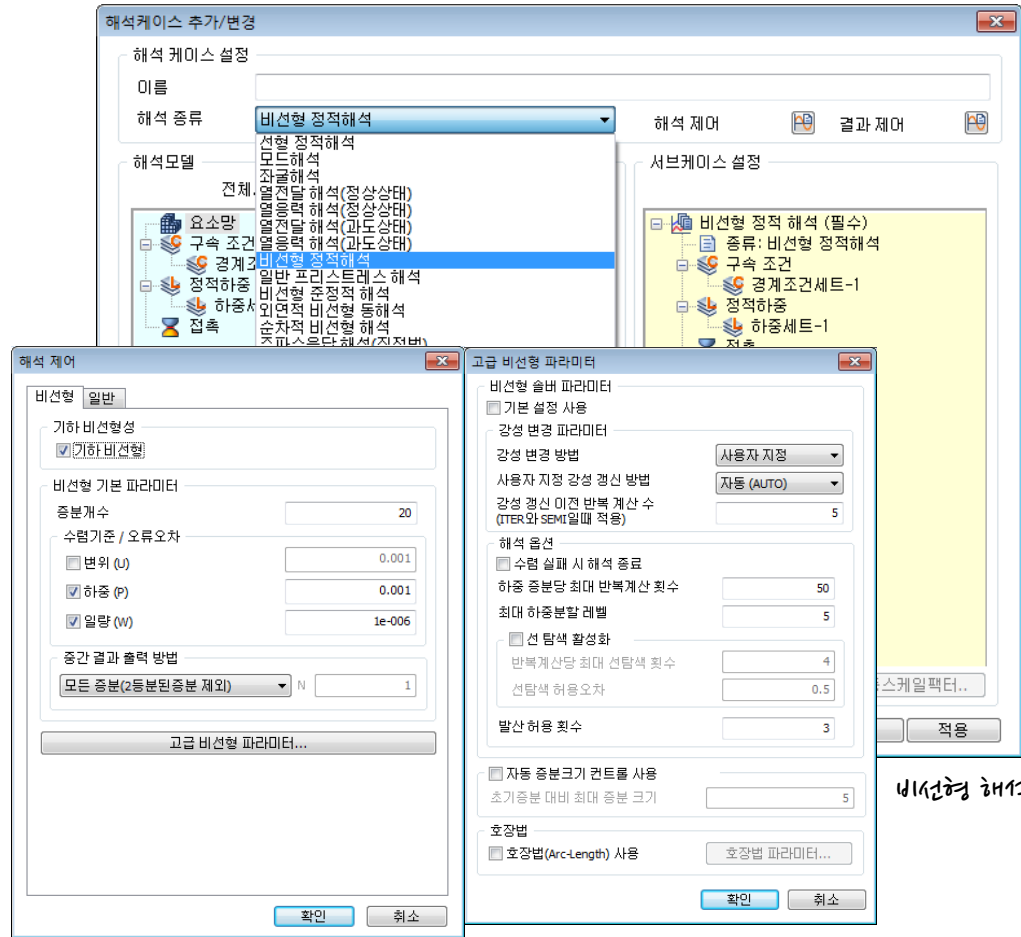
3. 증분개수, 수렴기준 설정 방법

4. 중간 결과 출력 방법

5. 고급 비선형 파라미터 사용법

6. 서브케이스 사용법

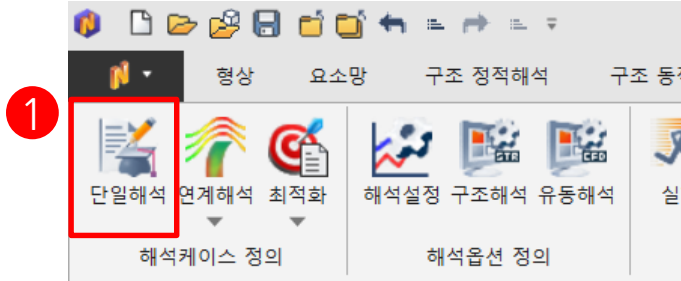
7. 리스타트 기능 사용법



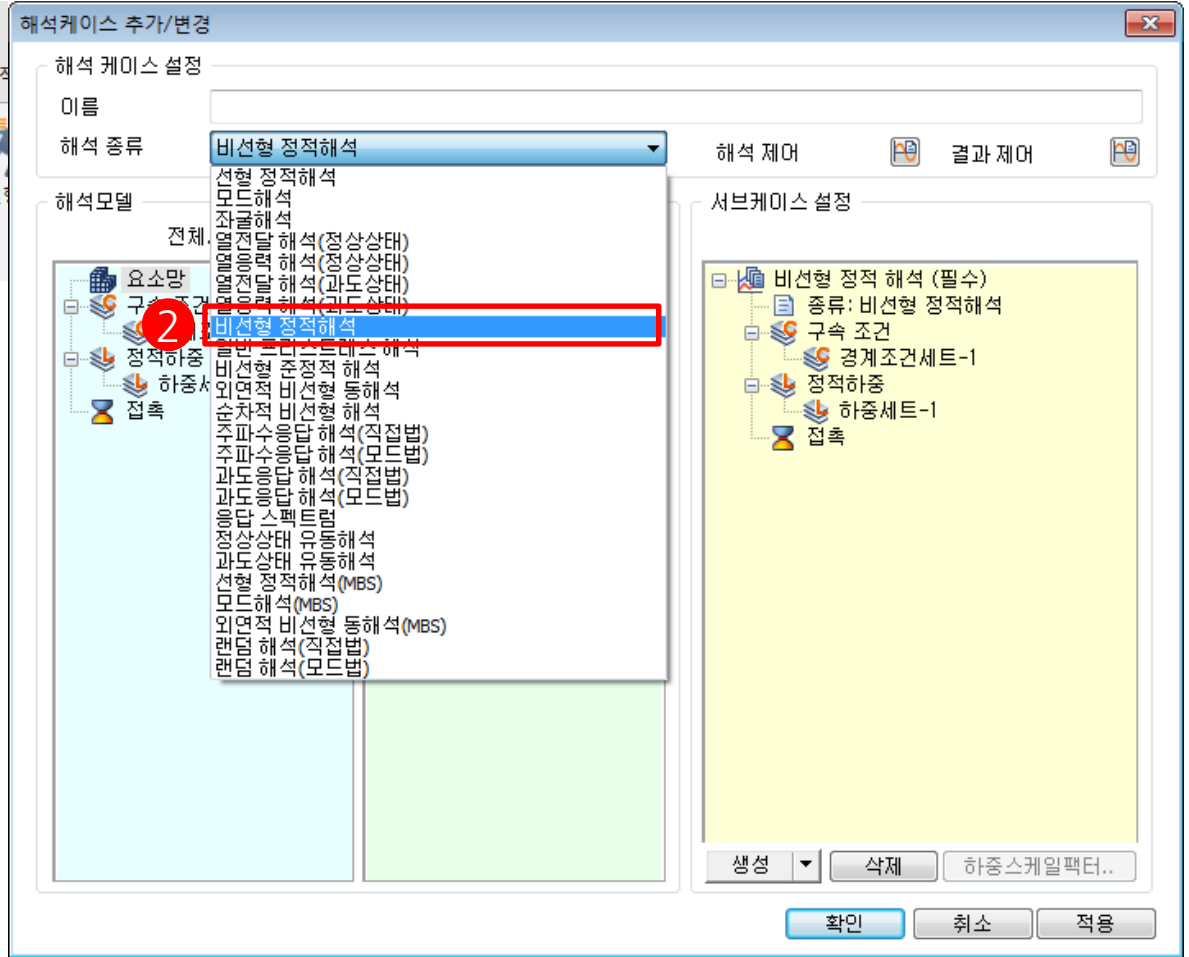
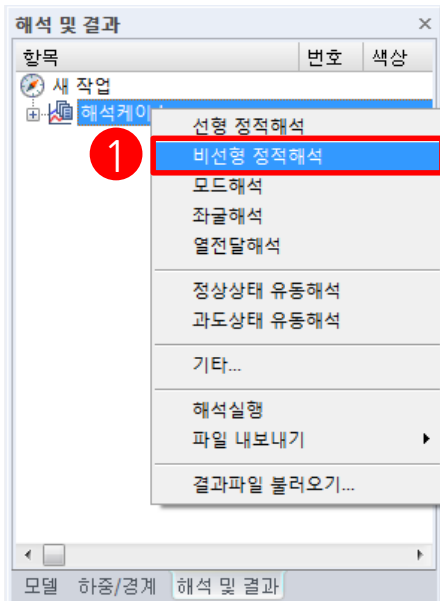
비선형 해석 옵션

해석 케이스 정의하는 법

해석 및 결과 >> 해석케이스 >> 일반



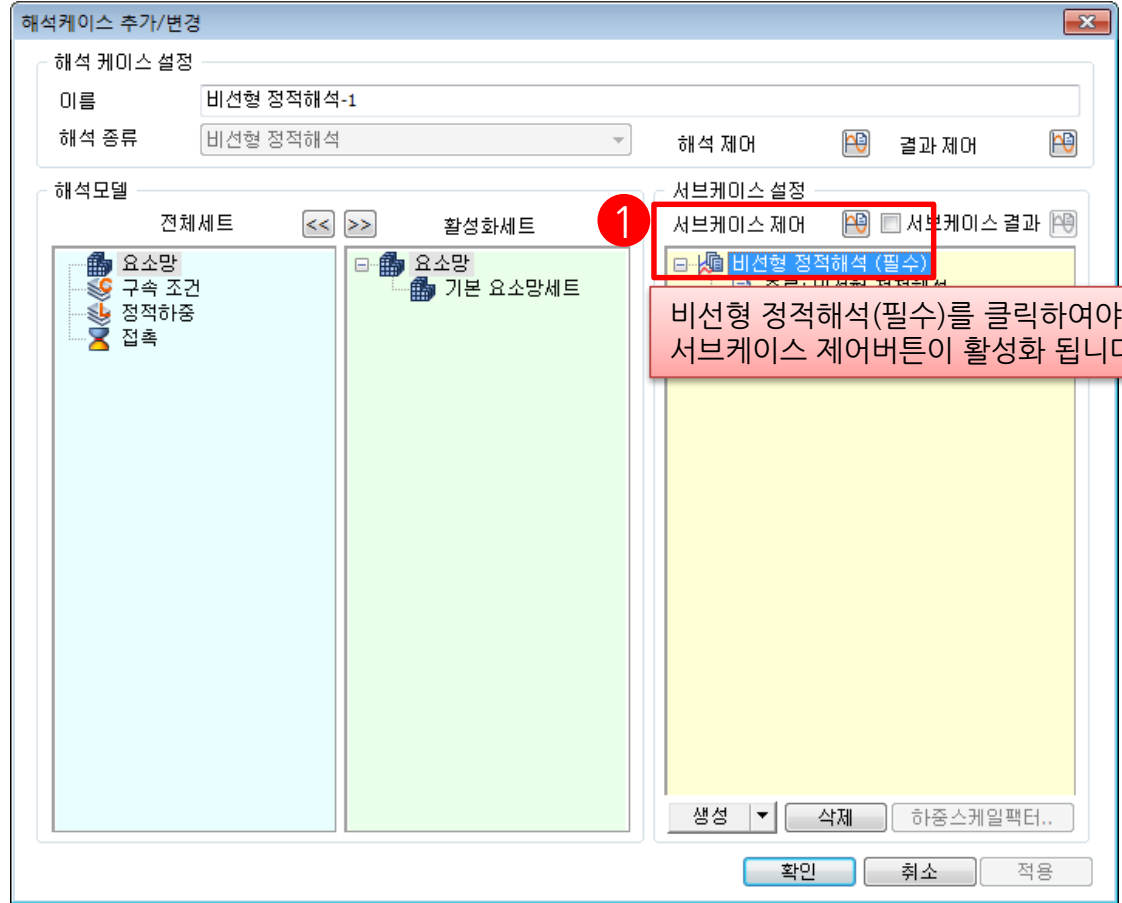
or



기하비선형 고려하는 방법



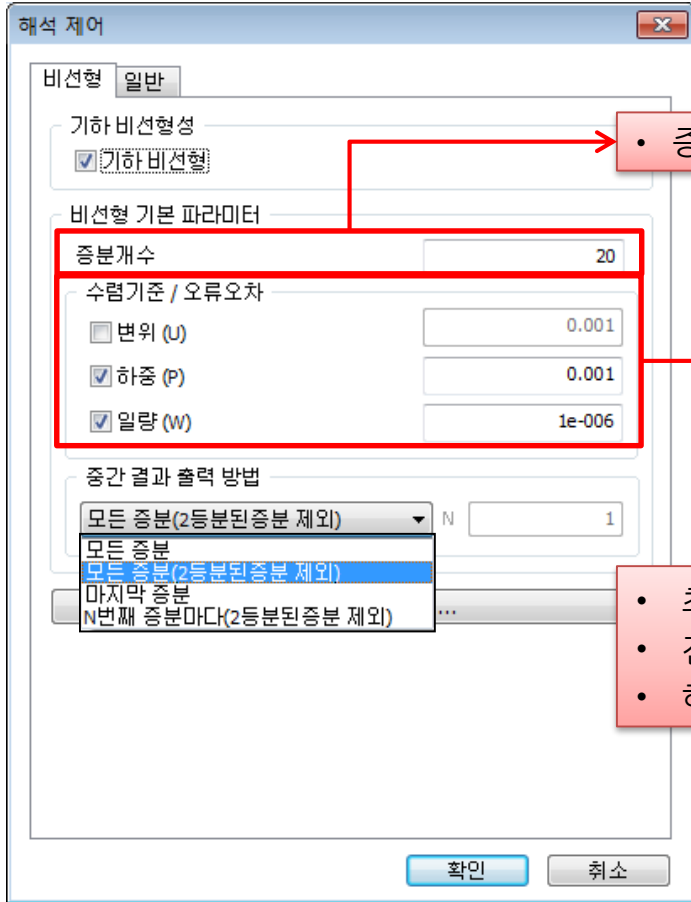
기하비선형을 고려할 경우 체크.



비선형 정적해석(필수)를 클릭하여야만 서브케이스 제어버튼이 활성화 됩니다.

✓ 기하비선형을 고려해야 하는지 여부에 대하여 판단이 명확하게 되지 않는 경우에는 일단 옵션을 체크하고 해석하는게 좋다.

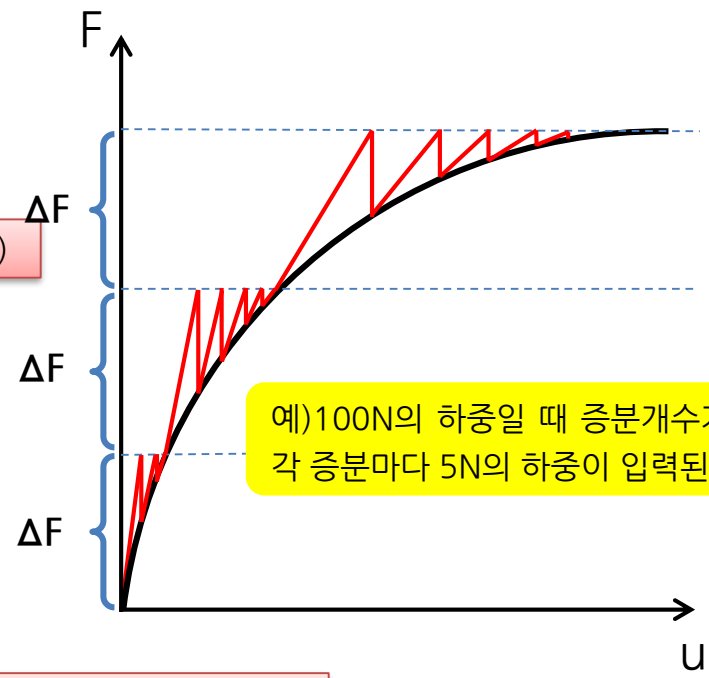
증분개수, 수렴기준 설정 방법



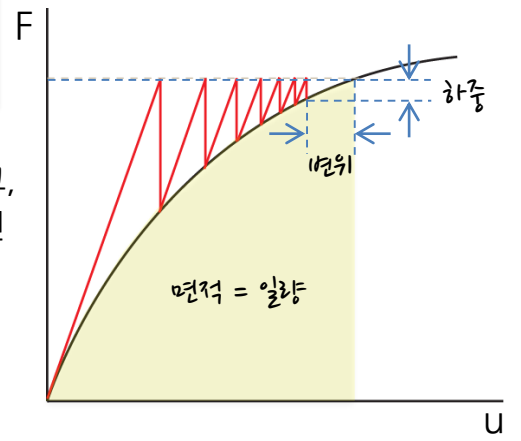
• 증분갯수를 결정 (ΔF 의 개수)

- 최소한 2개의 조건이 선택 되어야 함
- 전통적으로 많이 사용되는 수렴조건은 하중+일량
- 하중에 민감하지 않은 시스템에서는 변위를 사용함

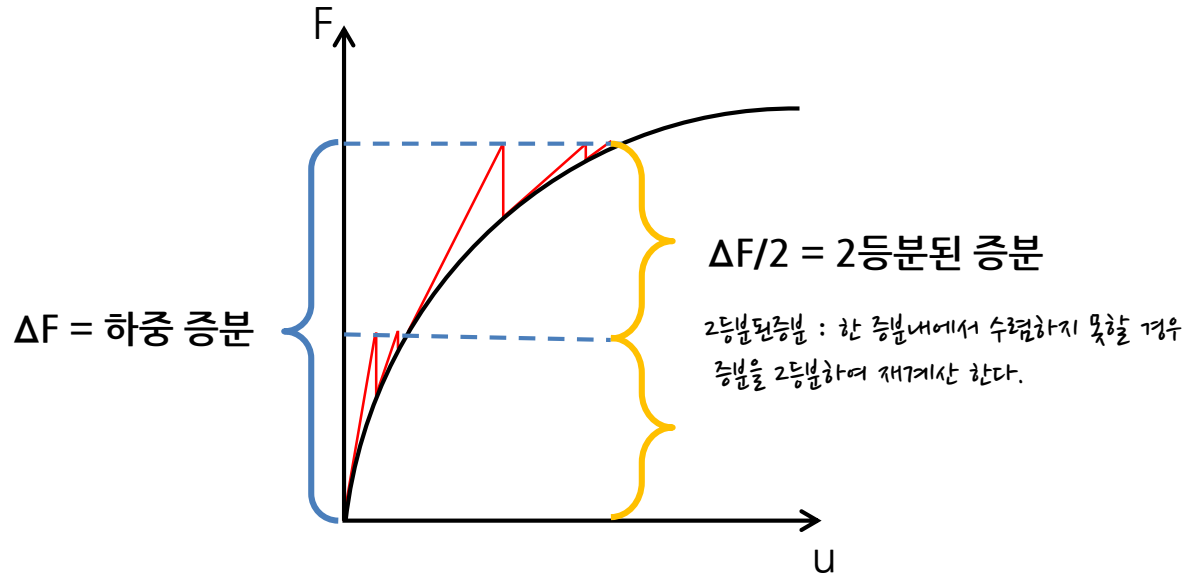
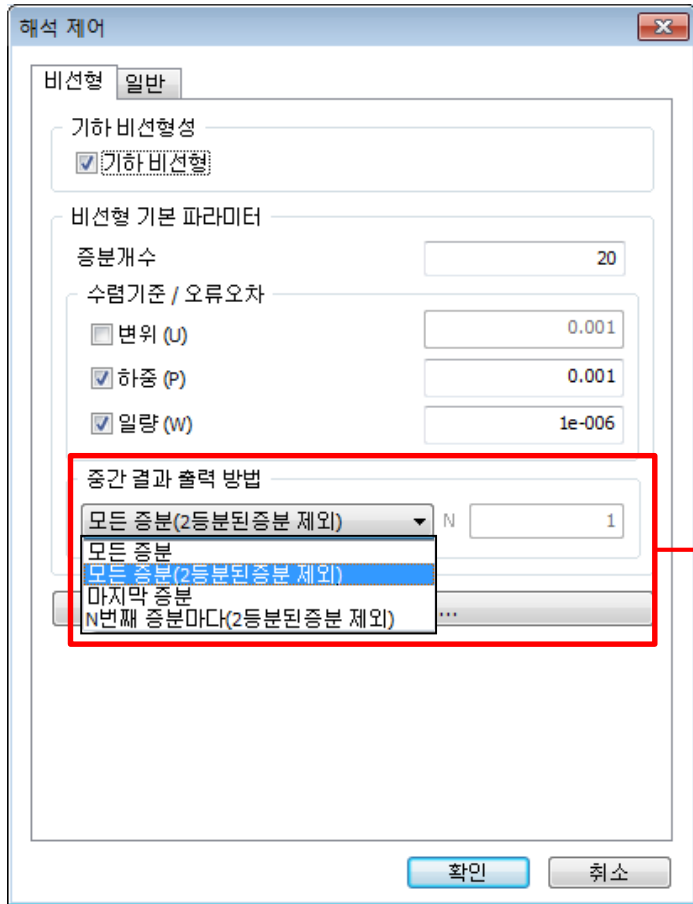
💡 3개의 조건이 선택되면 수렴하기가 매우 어렵고, 1개의 조건을 선택하면 수렴은 쉬우나 합리적인 결과를 얻기 어렵다.



예) 100N의 하중일 때 증분개수가 20이면 각 증분마다 5N의 하중이 입력된다.



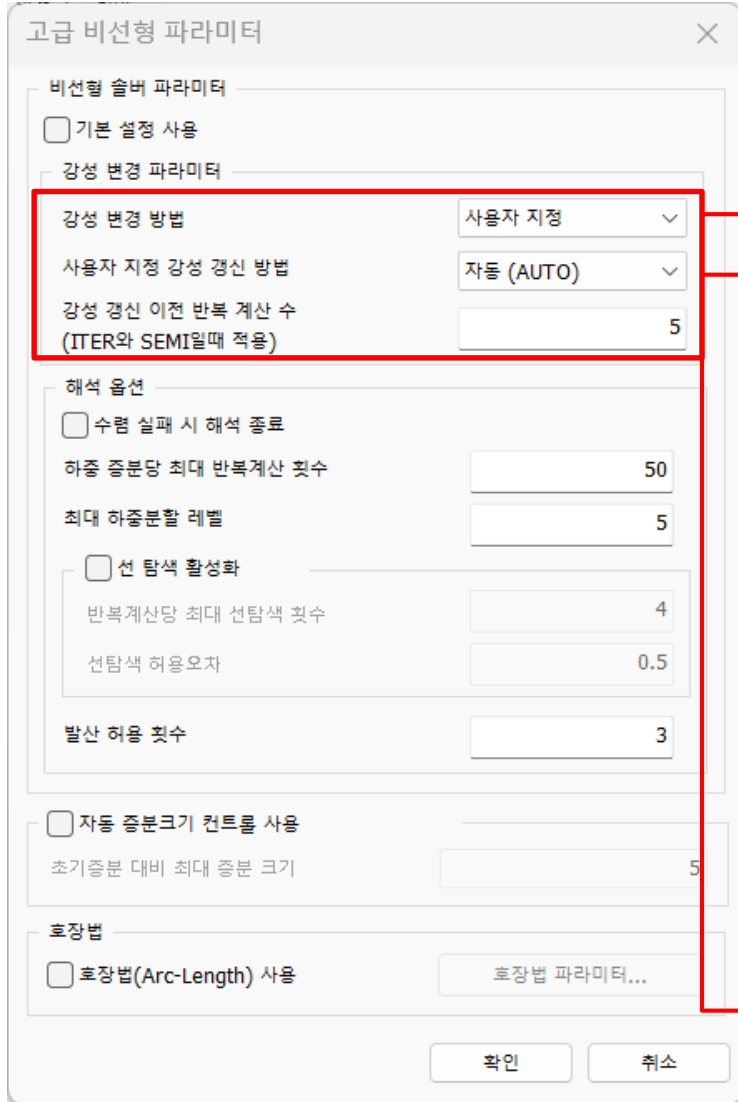
중간결과 출력방법



- 모든증분 : 2등분된 증분을 포함한 모든 증분의 결과를 출력
- 모든증분(2등분된증분 제외) : 2등분된 증분을 제외한 모든 증분의 결과를 출력
- 마지막 증분 : 마지막 증분의 결과를 출력
- N번째 증분마다 2등분된증분 제외 : 설정한 증분간격으로 결과로 출력

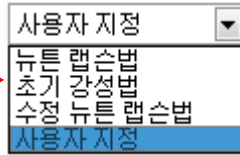
💡 비선형해석에서는 선형해석과 달리 한 개의 계산 결과만 존재하는 것이 아니라 증분개수 만큼의 결과를 또는 수렴이 안 되는 경우에는 2등분된 결과(그 이상 등분될 수 있다.)를 출력하기도 한다. 원하는 스텝에서의 결과를 보기 위해서는 상기 옵션을 조절하여 결과를 확인하는 것이 좋다.

고급비선형 파라미터-1

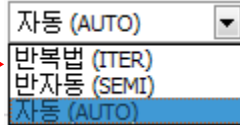


→ 기본 설정 사용을 체크 오프 하면,

강성 변경 파라미터와 해석 옵션을 수정하여 적용할 수 있다.



→ 강성 변경 방법을 수정할 수 있다. 앞서 설명했던 것처럼, midas NFX에서는 기본 설정 사용인 경우 midas NFX이 수렴 속도에 대응하여 접선강성의 재계산 시점을 정의함으로써 모든 반복법의 효과를 얻을 수 있다 = 자동(AUTO)



- SEMI : 각 하중 증분의 새로운 하중을 대상으로 1회의 반복을 수행한 후, 갱신한다.
- ITER : 각 스텝이 반복될 때마다 강성이 갱신된다.

강성 갱신 이전 반복 계산 수 = 1 인 경우 뉴턴 랩슨법 실행

강성 갱신 이전 반복 계산 수 = 하중 증분당 최대 반복계산 횟수인 경우 수정 뉴턴 랩슨법 실행

강성 갱신 이전 반복 계산 수 > 하중 증분당 최대 반복계산 횟수 인 경우에는 강성갱신이 되지 않는다.

- 강성행렬이 재계산 되는 경우는 사용자가 지정한 최대 반복계산 횟수 보다 실제 반복계산 횟수가 많은 경우이거나 해가 발산한 경우이다. 기본설정은 "5회"로 되어 있다.

고급비선형 파라미터-2

고급 비선형 파라미터

비선형 솔버 파라미터

기본 설정 사용

강성 변경 파라미터

강성 변경 방법 사용자 지정

사용자 지정 강성 경신 방법 자동 (AUTO)

강성 경신 이전 반복 계산 수 (ITER와 SEMI일때 적용) 5

해석 옵션

수렴 실패 시 해석 종료

하중 증분당 최대 반복계산 횟수 50

최대 하중분할 레벨 5

선 탐색 활성화

반복계산당 최대 선탐색 횟수 4

선탐색 허용오차 0.5

발산 허용 횟수 3

자동 증분크기 컨트롤 사용

초기증분 대비 최대 증분 크기 5

호장법

호장법(Arc-Length) 사용 호장법 파라미터...

• 수렴 실패시 해석 종료

→ 수렴 실패시 해석이 종료됨. 선택하지 않는다면 수렴하지 않은 경우에도 해석을 진행한다.

• 하중 증분당 최대 반복계산 횟수

→ 단일 증분에서 허용되는 최대 반복계산 수를 지정한다. 설정한 값에도 달한 후에도 수렴이 되지 않는다면 설정된 하중 증분이 2분할(Bisection)되어 해석이 다시 진행된다.

예) 10N의 하중이 수렴이 되지 않는 5N으로 다시 반복계산 진행한다.

• 최대 하중분할 레벨

→ 하중 증분이 2분할 되는 횟수를 설정한다.

예) 레벨이 5인 경우, 10N의 하중이면 5N, 2.5N, 1.25N, 0.625N, 0.3125N까지 총 5회 분할될 수 있다.

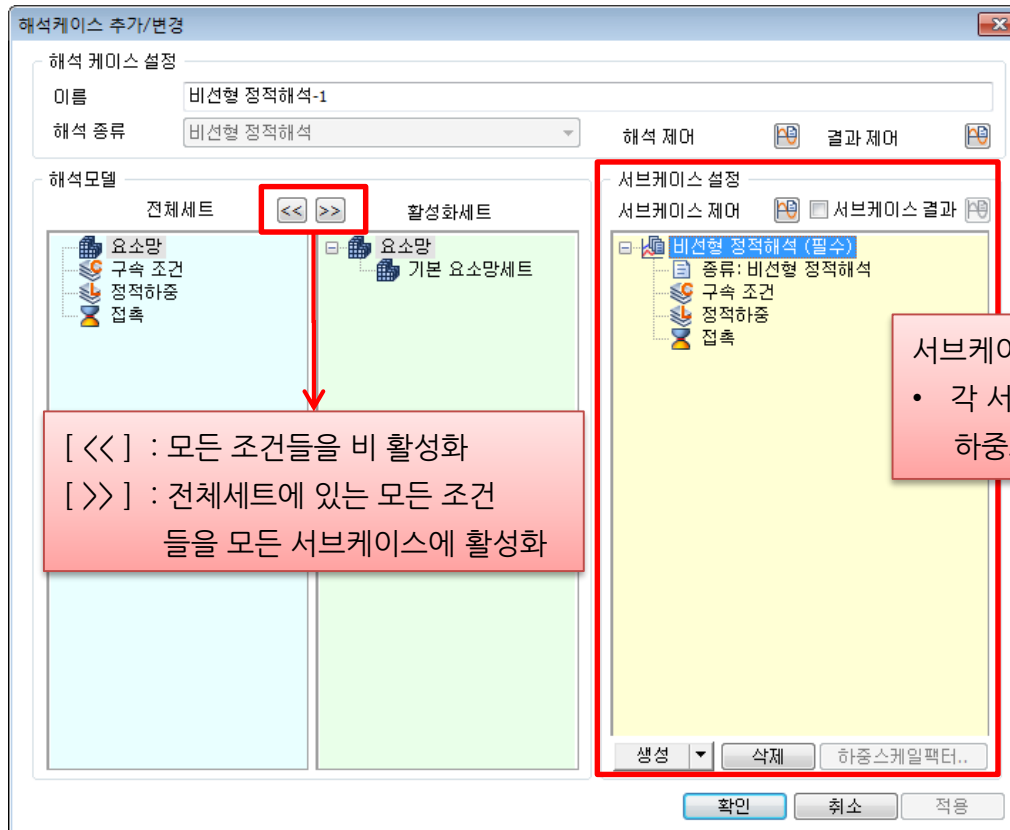
• 선 탐색 활성화

→ 비선형 해석의 해가 진동하면서 수렴되는 특성을 가진 문제인 경우 수렴성 개선에 도움이 된다.

서브케이스 (하중스텝) 사용법-1

- 서브케이스는 해석할 문제를 정의하는 하중과 경계조건의 집합
- 각 서브케이스의 결과는 연동되어 다음 서브케이스 결과에 영향을 준다.

해석 및 결과 >> 해석케이스 >> 일반



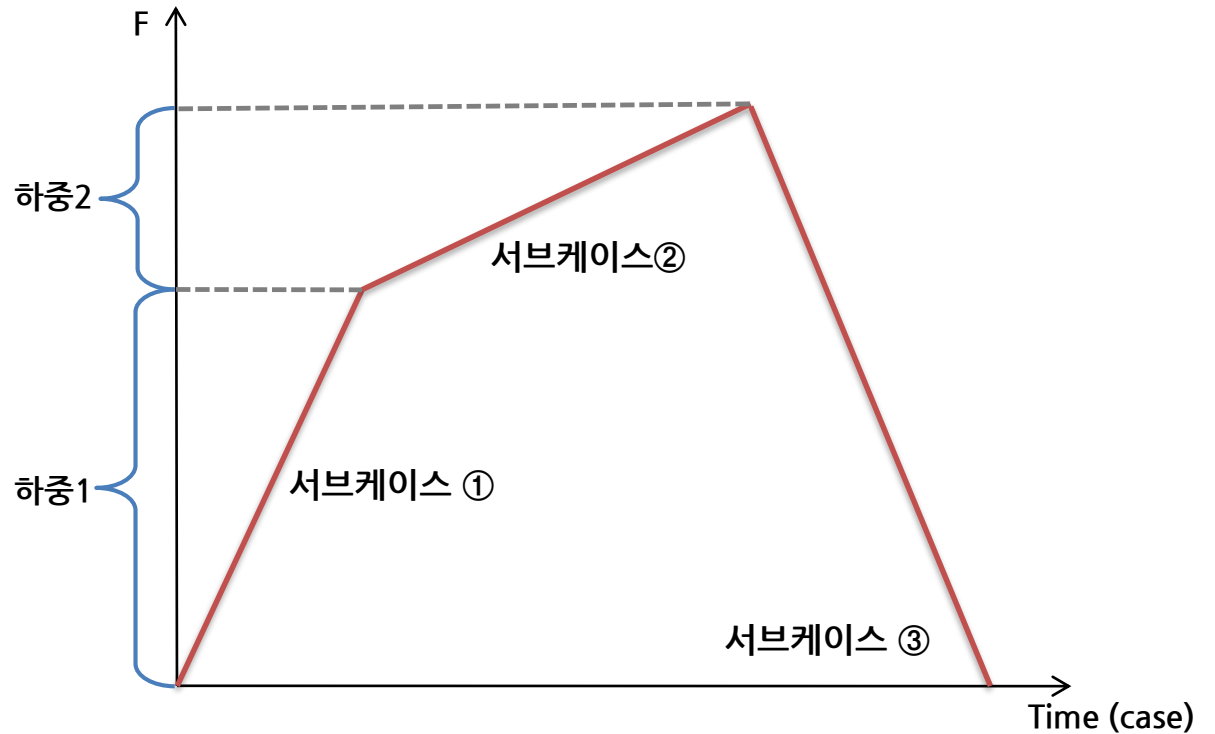
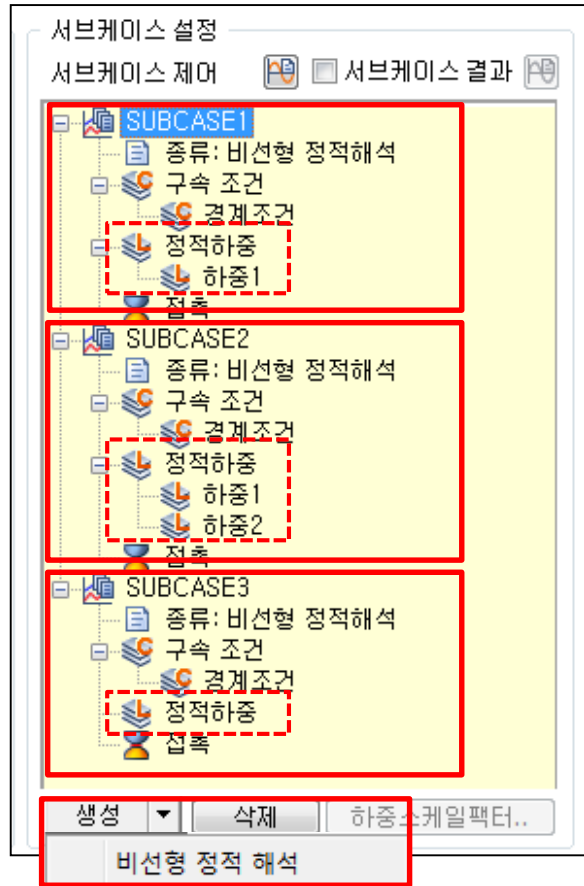
[<<] : 모든 조건들을 비 활성화
[>>] : 전체세트에 있는 모든 조건
들을 모든 서브케이스에 활성화

서브케이스 설정창

- 각 서브케이스는 drag & drop을 사용하여 구속조건이나 하중조건을 적용할 수 있다.

→ 서브케이스 제어/ 서브케이스 결과는 각각의 서브케이스 세트를 클릭해야만 활성화 된다.

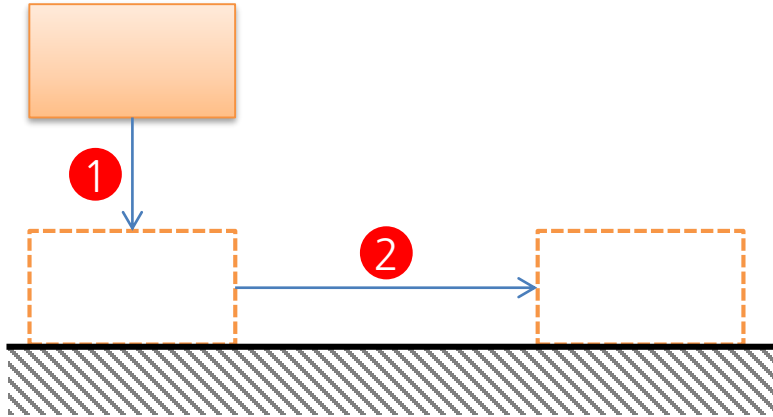
서브케이스 (하중스텝) 사용법-2



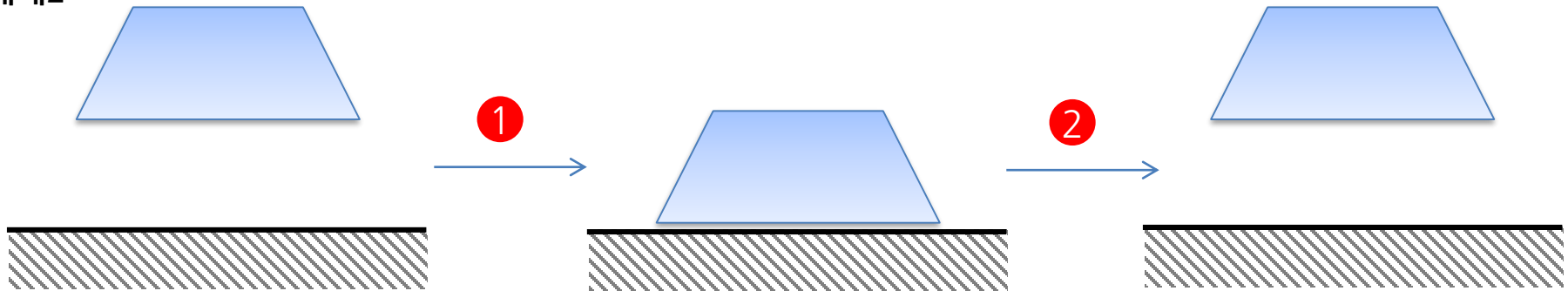
- 서브케이스 ① : 하중1이 가해짐
- 서브케이스 ② : 하중1이 가해진 상태에서 하중2가 추가적으로 가해짐
- 서브케이스 ③ : 하중이 모두 제거됨

서브케이스 (하중스텝) 사용법-3

예제1



예제2

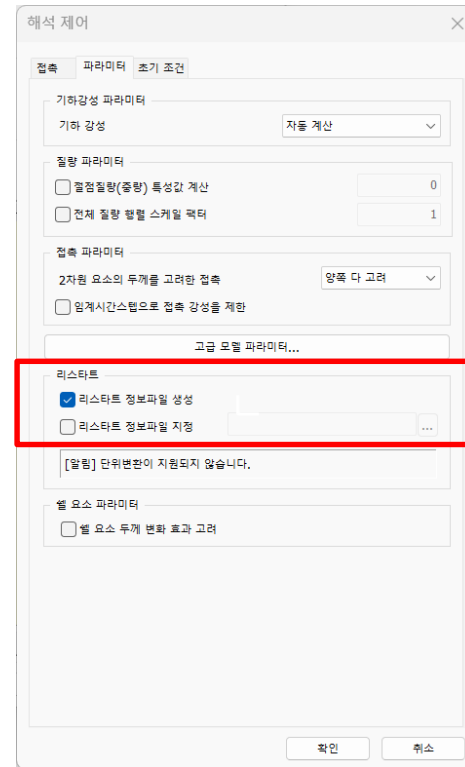
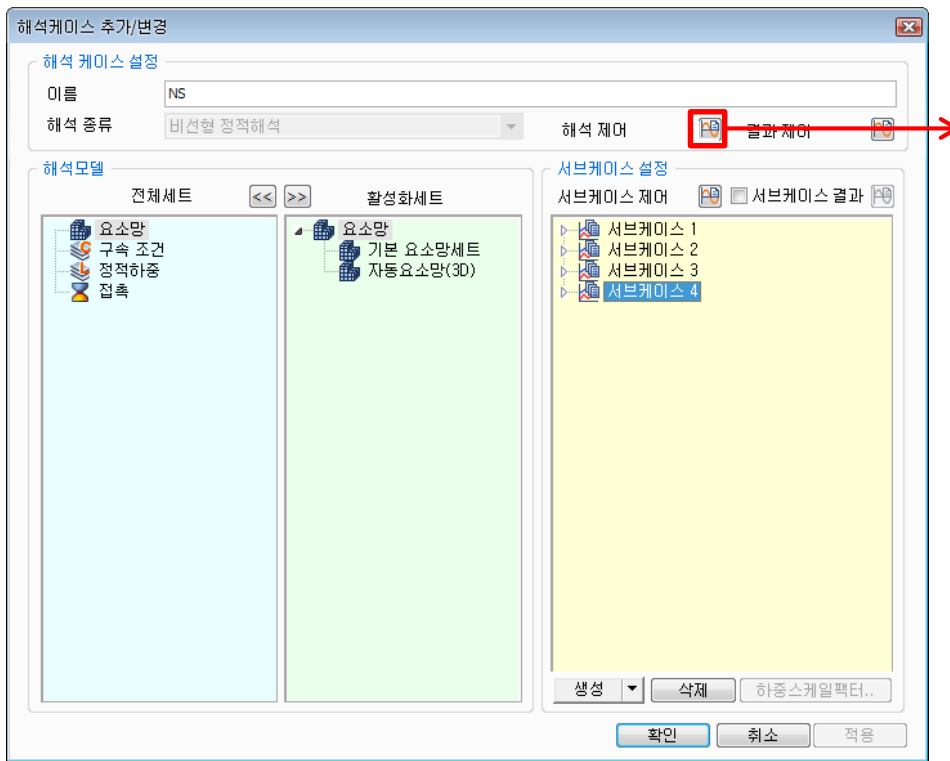


리스타트(Restart) 기능 사용법-1

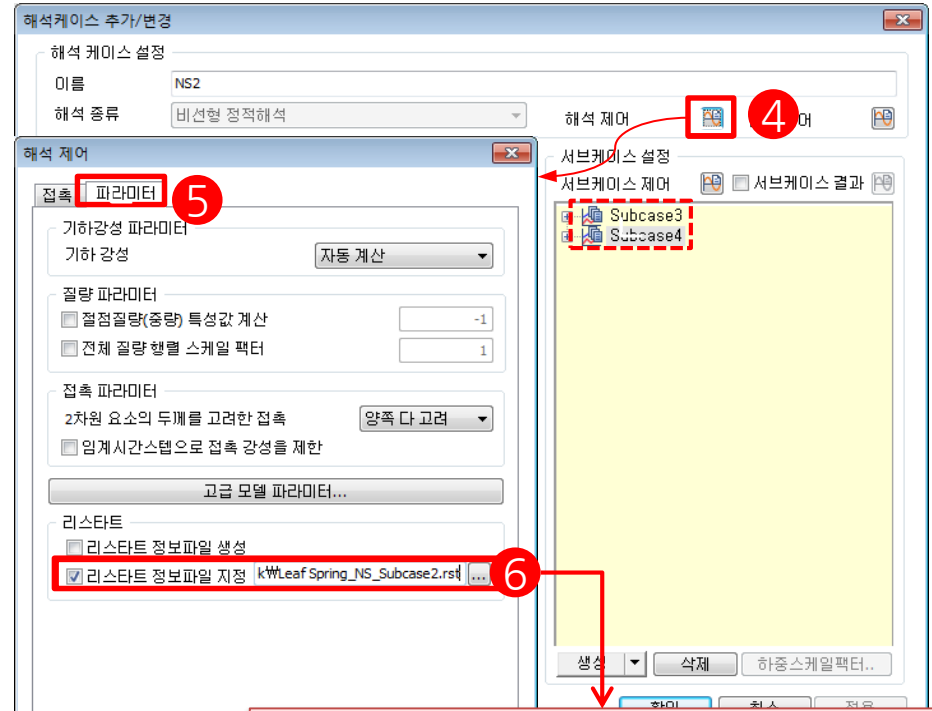
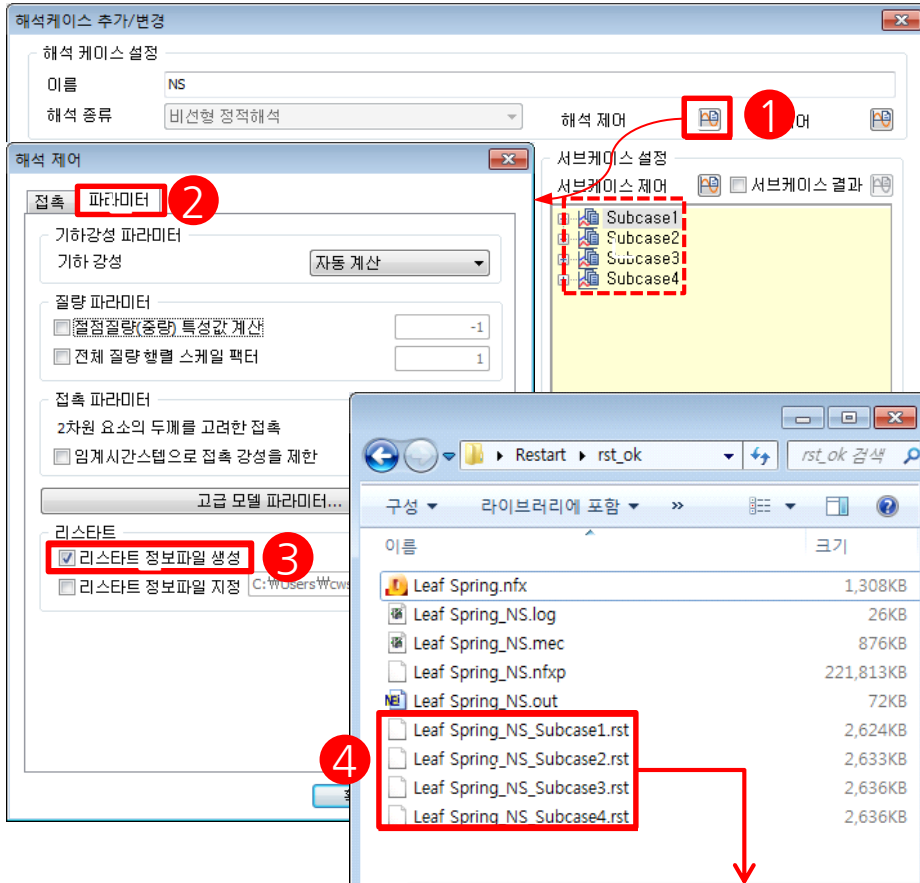
비선형성이 강해지는 환경에 도달하면 해의 **수렴이 곤란하여 해석이 중단되는 경우가 존재**

이런 경우에 파라미터 값을 수정하여(증분개수, 수렴조건 등) 해석을 재실행하게 되는데, 처음부터 해석을 다시 실행하면 수렴된 구간도 모두 다시 해석하게 되므로 해석시간의 손실이 상당

→ 수렴된 구간까지는 결과를 그대로 이용하고, 해석이 중단 된 곳부터 다시 시작할 수 있는 리스타트 방법을 사용



리스타트(Restart) 기능 사용법-2



4개의 서브케이스 중 2번째 서브케이스의 결과에 이어서 해석한다면 3, 4번째 서브케이스만 존재해야 한다

4개의 서브케이스가 존재하는 해석을 진행하면 다음과 같이 4개의 리스타트 파일이 생성된다.

등가응력(Equivalent Stress)

비선형 정적해석(필수) 우클릭

해석결과추가...

솔리드요소 (Solid) 응력

솔리드요소 X방향 응력
 솔리드요소 Y방향 응력
 솔리드요소 Z방향 응력
 솔리드요소 XY방향 전단 응력
 솔리드요소 YZ방향 전단 응력
 솔리드요소 ZX방향 전단 응력
 솔리드요소 1 주응력
 솔리드요소 3 주응력
 솔리드요소 2 주응력
 솔리드요소 최대 주응력
 솔리드요소 최소 주응력
 솔리드요소 최대 전단 응력
 솔리드요소 등가응력
 솔리드요소 von-Mises 응력
 솔리드요소 소성 상태
 솔리드요소 평면응력 응력
 솔리드요소 표면응력
 솔리드요소 1 주응력 X축 코사인
 솔리드요소 2 주응력 X축 코사인
 솔리드요소 3 주응력 X축 코사인
 솔리드요소 1 주응력 Y축 코사인
 솔리드요소 2 주응력 Y축 코사인
 솔리드요소 3 주응력 Y축 코사인

등가응력 결과확인 시, 절점평균 체크 해제

레전
 최대/최소 모든 요소
 컨투어선 상태초기화
 보이기/감추기

모두 선택 모두 선택해제 현재 선택 현재 선택해제

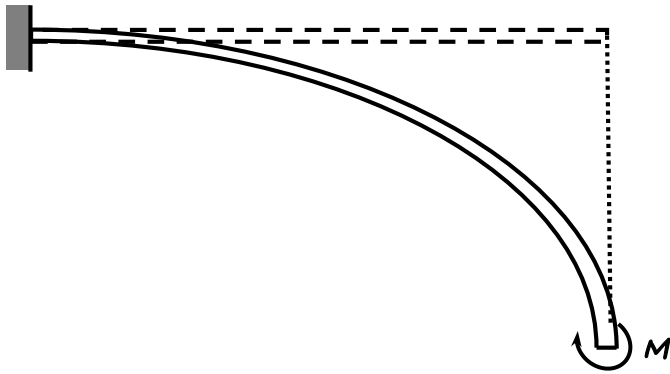
솔리드요소 등가응력 체크 후, 확인

✓ 재료비선형인 경우(탄소성 모델을 정의한 경우) 등가응력을 확인 해야 하며, 재료비선형이 고려되지 않는 경우 von-mises응력을 확인한다.

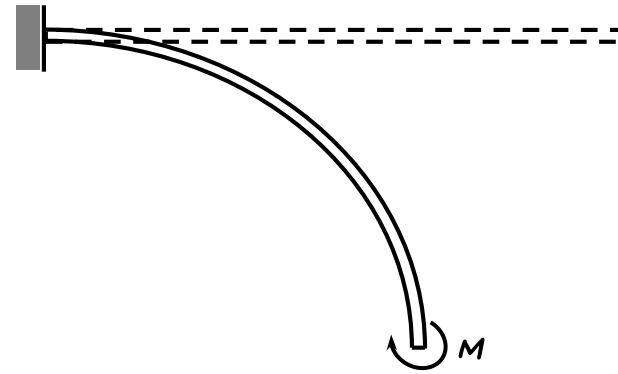
기하비선형

기하비선형 개요

- 구조물에 상대적으로 대변형/대회전(Large Deformation/Large Rotation)이 발생
- 대변형율(Large Strain)이 발생
- 변형이 과도하게 커짐에 따라 재료 물성치와는 무관하게 강성이 변화
- 종동하중(구조물의 변형에 따라 힘의 방향이 변하는 하중) 효과를 적용



선형



비선형

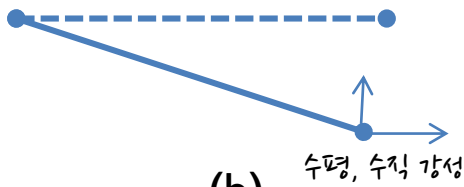
대변형/대회전

- 하중을 받는 구조물의 변위나 회전이 크게 발생하는 경우 구조물의 강성은 변하게 된다. 즉 요소가 회전하면서 구조물 전체의 강성이 변화가 생기게 되는 것이다.

아래와 같은 축방향으로만 하중을 받는 요소가 있다고 가정하자



(a)

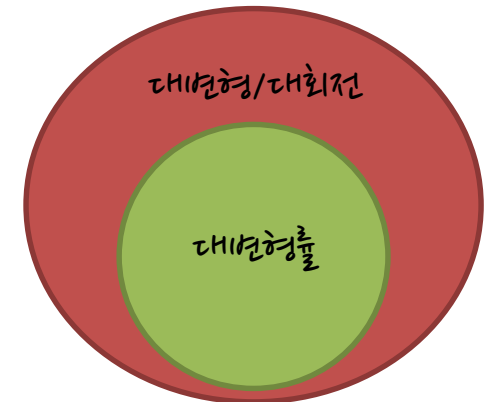
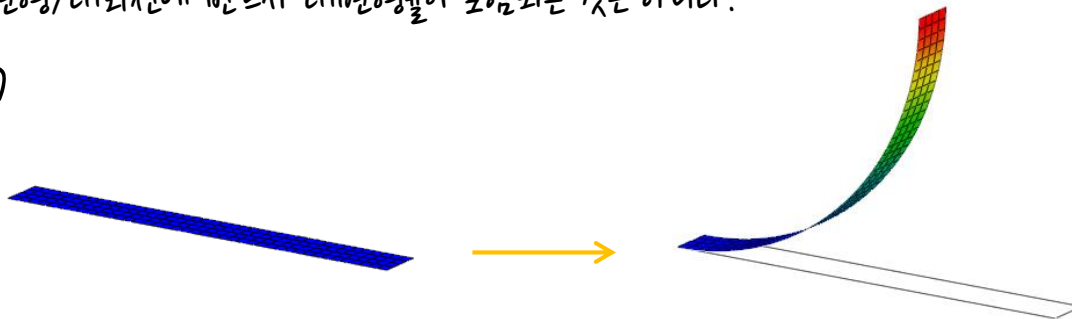


(b)

- (a) 수평방향으로의 강성만 존재한다.
- (b) 요소가 크게 회전하면서 수평, 수직방향으로의 강성이 생기게 된다.

※ 일반적인 기하비선형의 경우 대변형, 대회전 대변형률을 함께 포함하지만 대변형/대회전에 반드시 대변형률이 포함되는 것은 아니다.

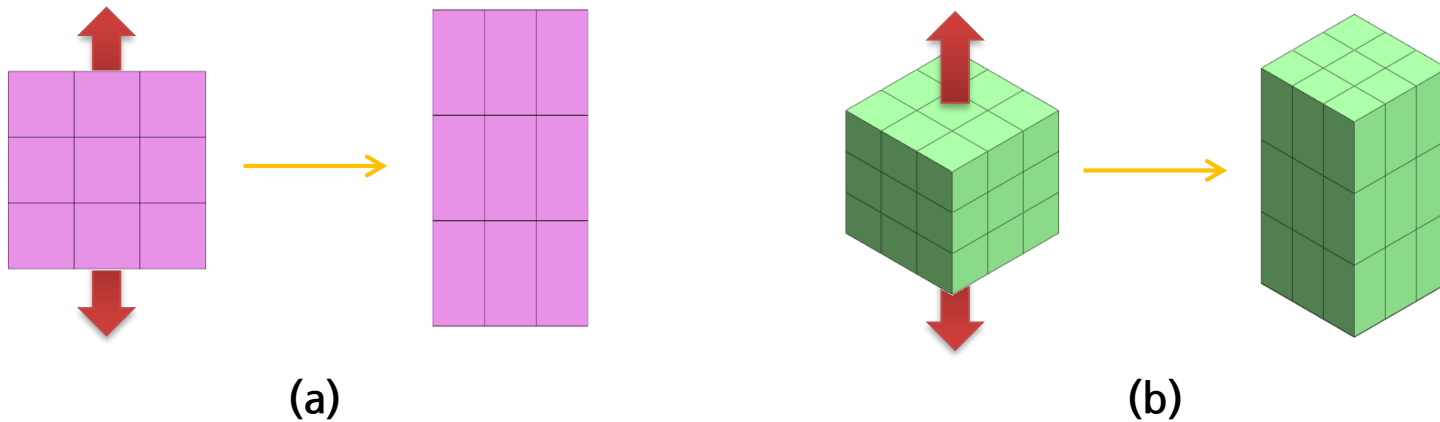
ex)



대변형률

- 하중을 받는 구조물의 변형이 생길 때, 요소의 면적이나 두께가 과도하게 변하는 경우 구조물의 강성은 변하게 된다.

아래와 같은 요소는 하중이 작용하면서 수직방향으로의 강성이 점점 약해진다



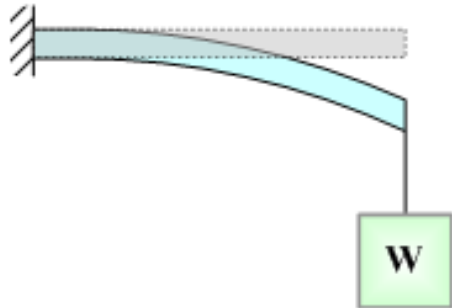
✓ 재료비선형이 포함되어 있는 경우, 대변형률이 함께 고려되는 경우가 많다.
즉, 응력-변형률 관계가 비선형일 경우에는 기하비선형을 고려하여 해석하는 것이 좋다.

종동력(Follower force)

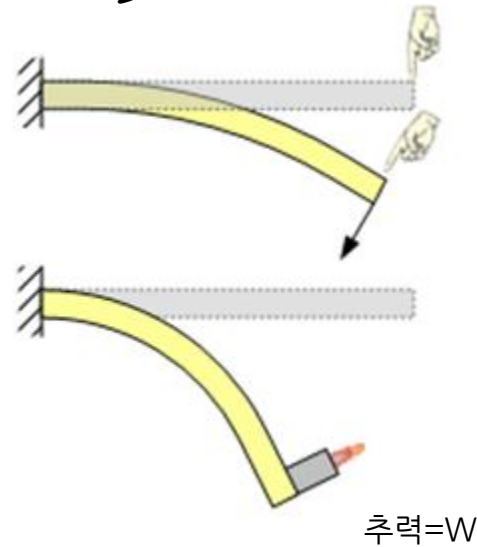
➤ 물체의 변형에 따라 위치나 방향이 변하는 힘을 의미

※ 종동력을 비선형성으로 나타내는 이유는??

힘의 방향이 물체의 변형에 의해 결정 → 물체의 변형은 다시 힘에 의해 결정



(a)



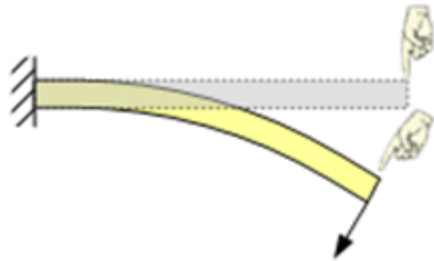
(b)

(a) 물체의 자중은 변함없이 아래방향이다.

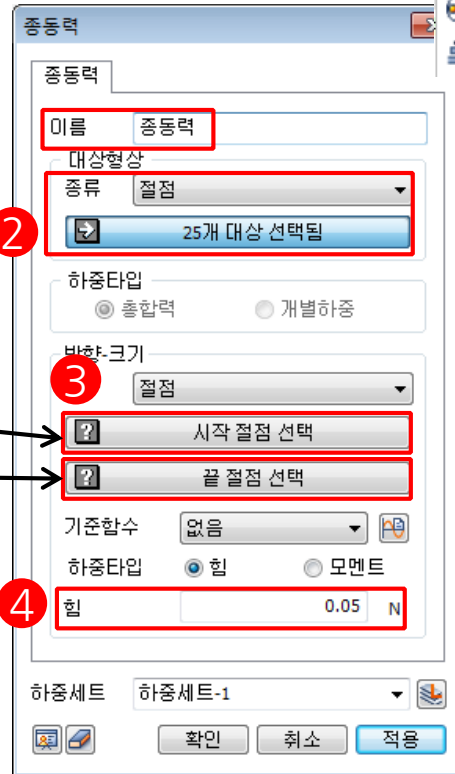
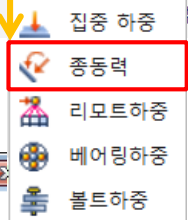
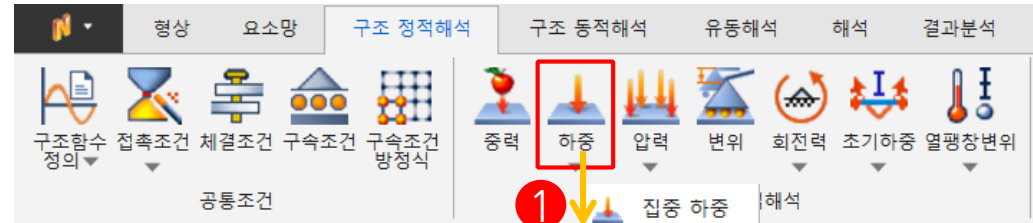
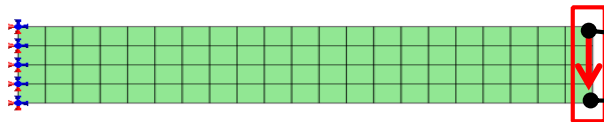
(b) 힘의 방향과 판자는 항상 수직이 되어야 하므로 판자가 기울어짐에 따라 힘의 방향이 변한다.(즉, 종동력)

종동력(Follower force)

▶ 아래그림처럼 종동하중을 입력하려면

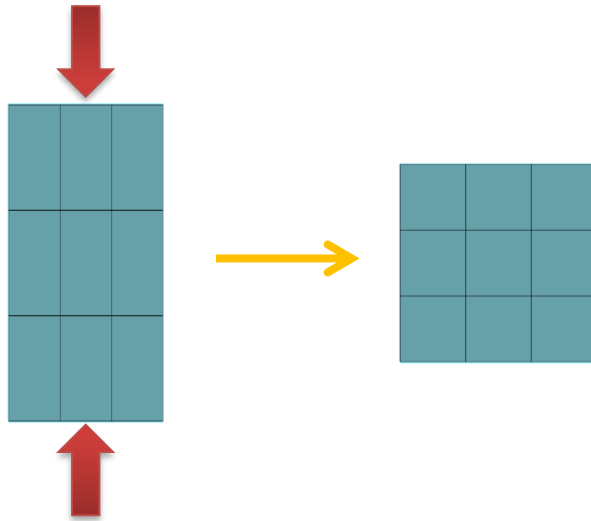


※ 시작절점 → 끝절점 방향으로 하중의 방향이 유지된다.



기하비선형이 포함되어 있는 경우 해석방법론

- 요소가 많은 변형을 일으키면 에러가 발생할 수 있으므로 요소망의 변형을 고려하여 요소망을 생성하는 것이 좋다.



- 요소의 특성상 변형이 많이 발생하는 고차요소보다는 저차요소가 해의 수렴에 유리하다.
- 수렴거동이 진동하게 되면(응력이 과도하게 발생하는 경우), 선탐색 기법을 사용하는 것이 수렴성 개선에 도움이 된다.

개요

➤ 선형정적해석

- 단위 : N, mm
- fishing_rod.nfx

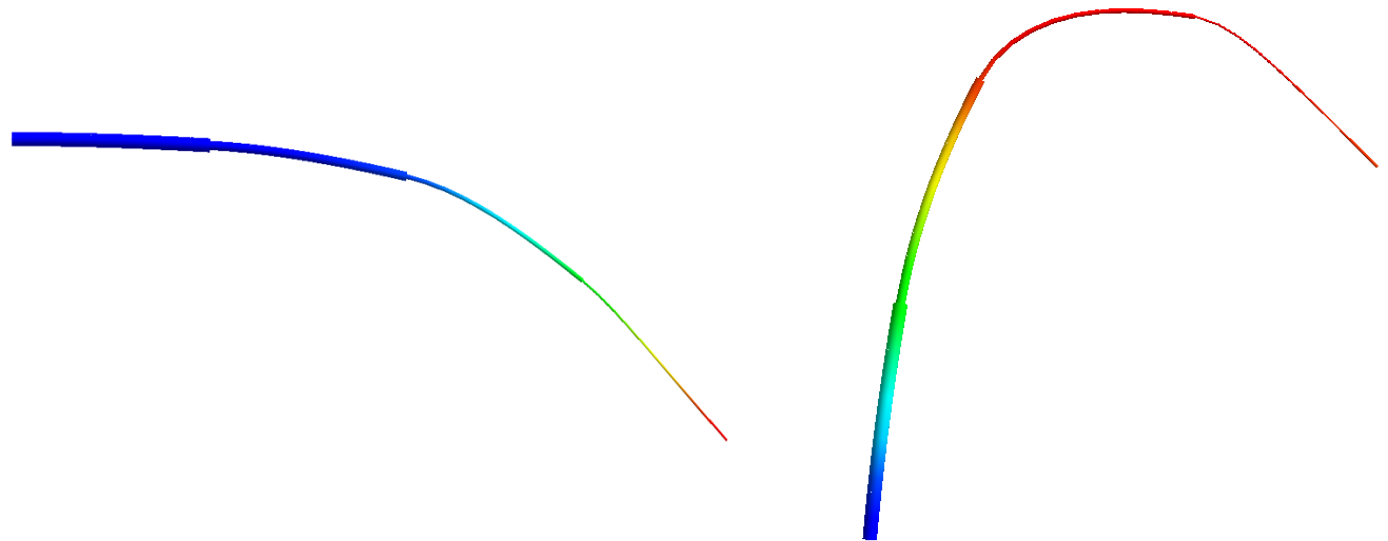
➤ 경계조건과 하중조건

- 경계조건 (고정구속)
- 집중하중
- 강제변위

➤ 결과확인

- 전체 변위
- 애니메이션

Fishing Rod



따라하기 목적

기하비선형의 이해 및 서브케이스 설정

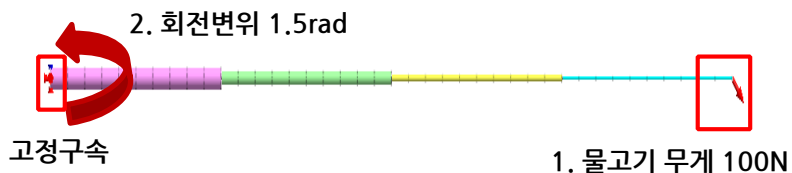
- 기하비선형 옵션을 설정하는 법을 습득합니다.
- 서브케이스 설정방법에 대해 이해합니다.

해석 개요

대상 모델



경계조건 및 하중조건



서브케이스 정의



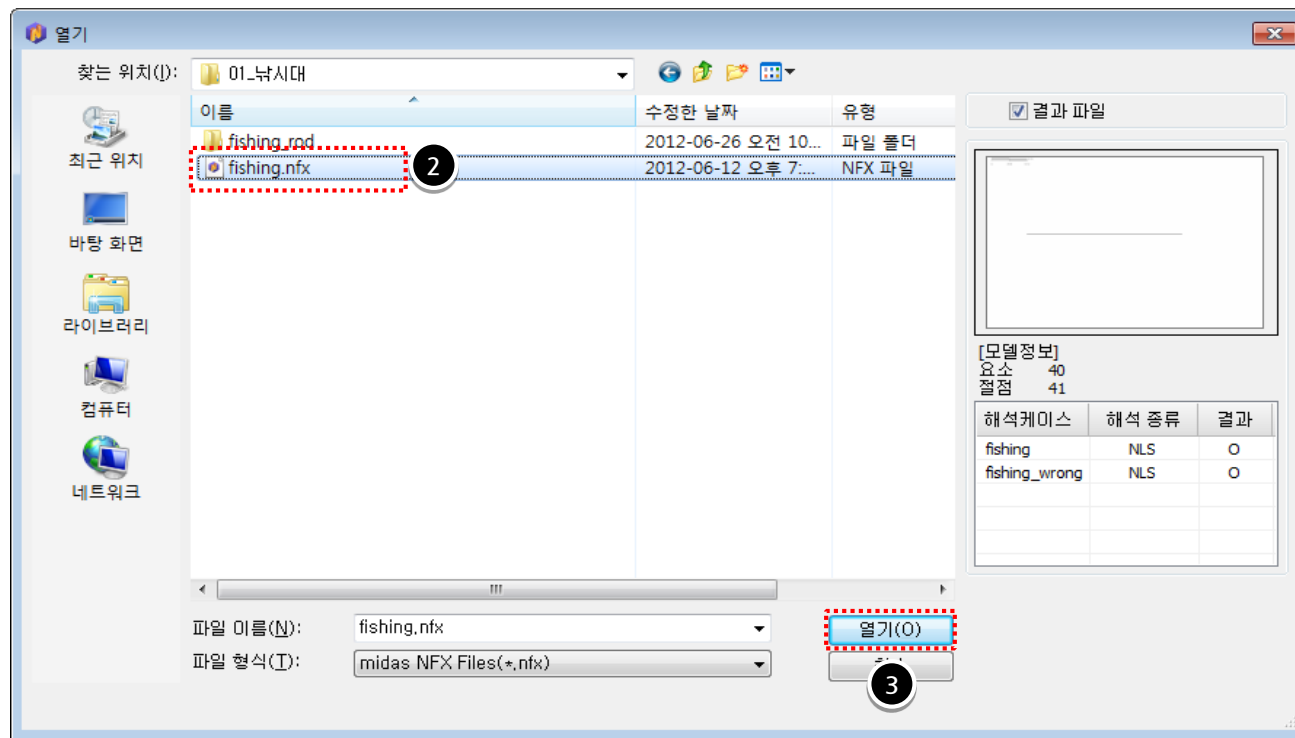
1. 물고기가 미끼를 물었을 때 하중

2. 기다림


3. 끌어올리기

작업순서

1. [열기] (열기) 클릭.
2. "fishing.nfx" 선택.
3. [열기] 버튼 클릭.



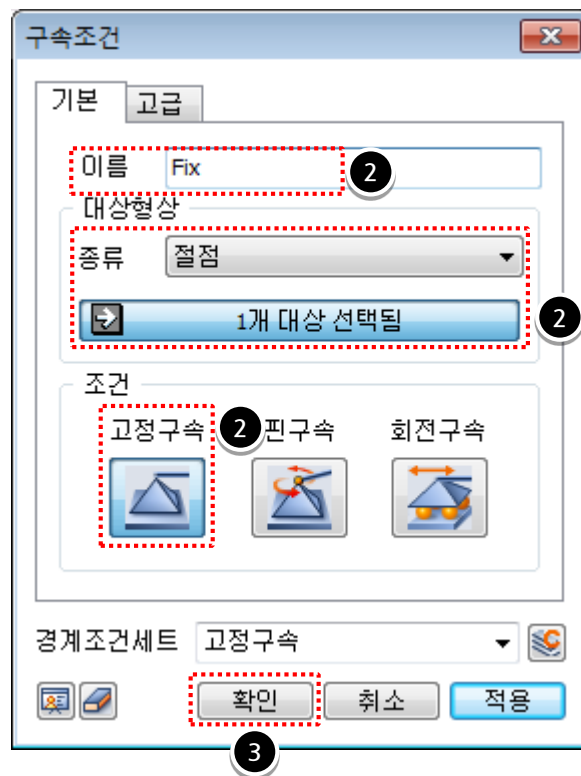
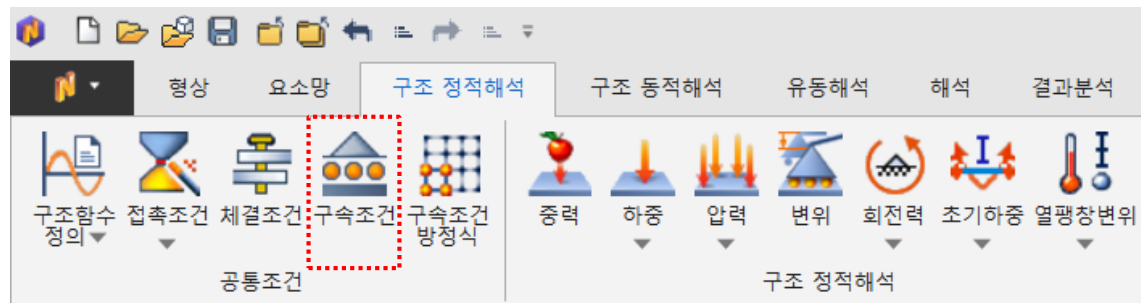
작업순서

1. [] (앞면 보기) 클릭.

2. 구속조건 입력

이름	Fix
대상종류	절점
대상선택	1개 선택(그림참조)
조건	고정구속

3. [확인] 버튼 클릭.

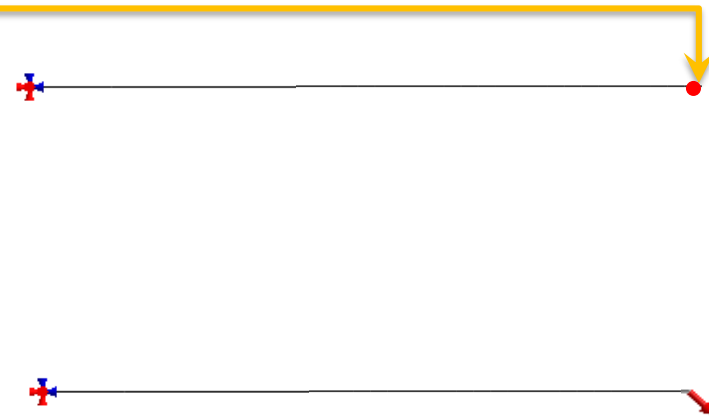
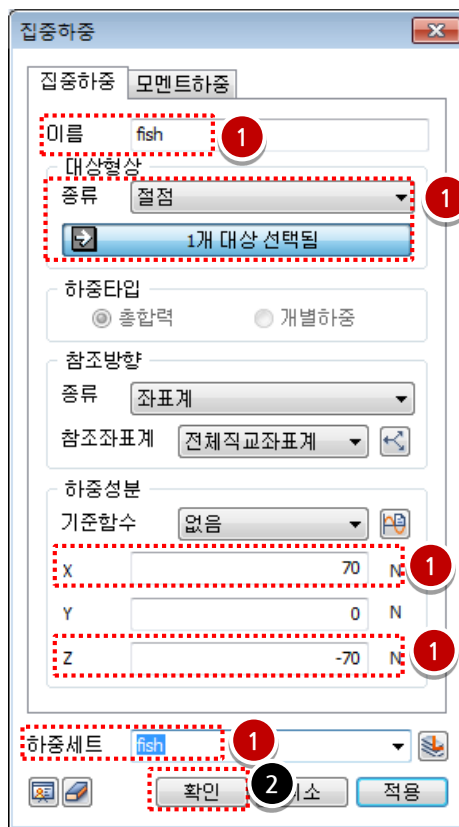
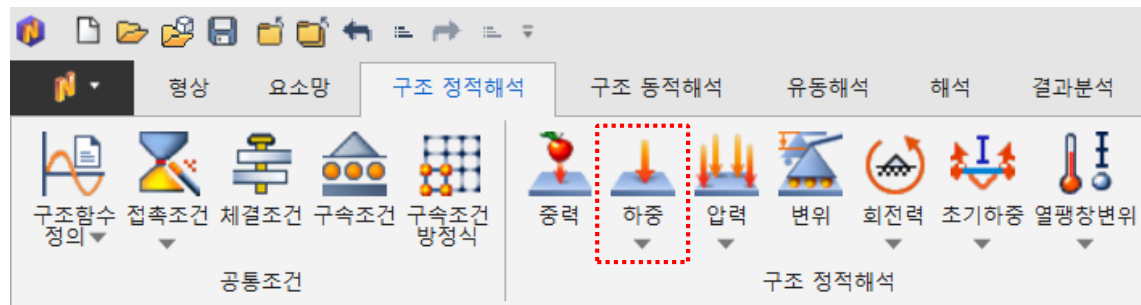


작업순서

1. 집중하중 입력

이름	fish
대상종류	절점
대상선택	1개 선택(그림참조)
하중(X-축)	70
하중(Z-축)	-70
하중세트	fish

2. [확인] 버튼 클릭.

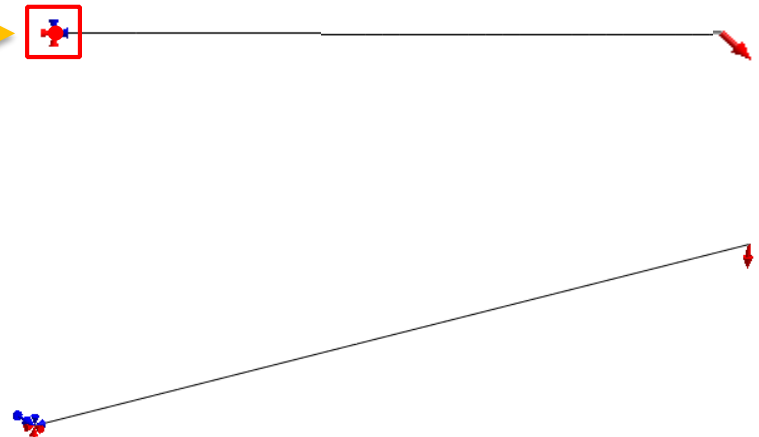
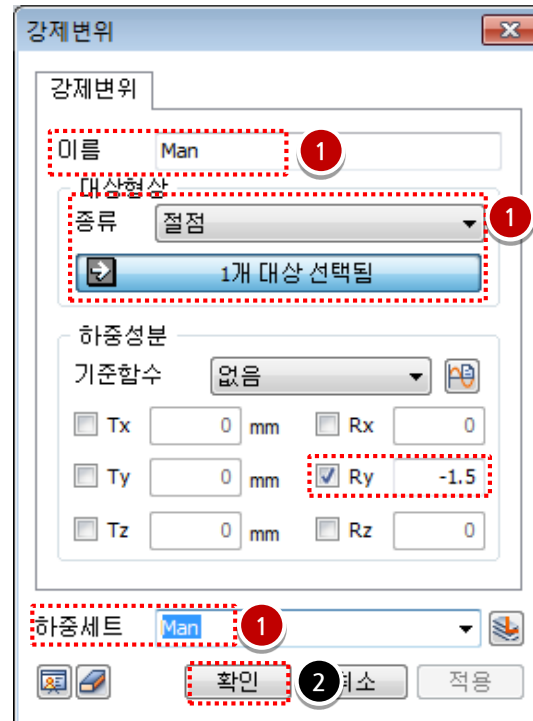
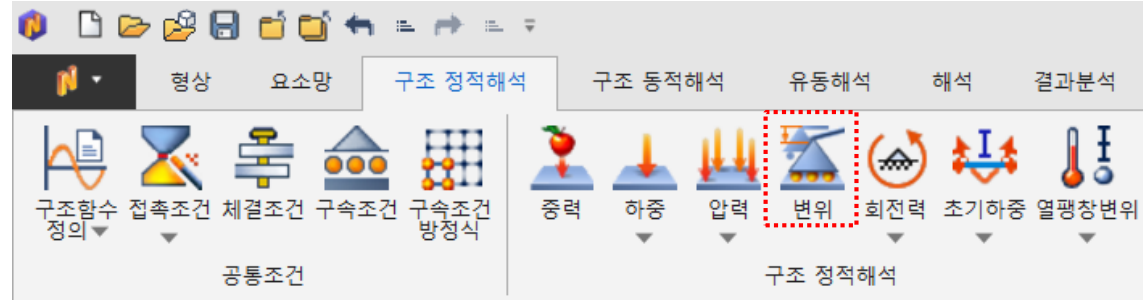


작업순서

1. 강제변위 입력

이름	Man
대상종류	절점
대상선택	1개 선택(그림참조)
하중(Ry)	-1.5
하중세트	Man

2. [확인] 버튼 클릭.



💡 강제변위-회전각의 단위는 라디안(rad)입니다.

작업순서

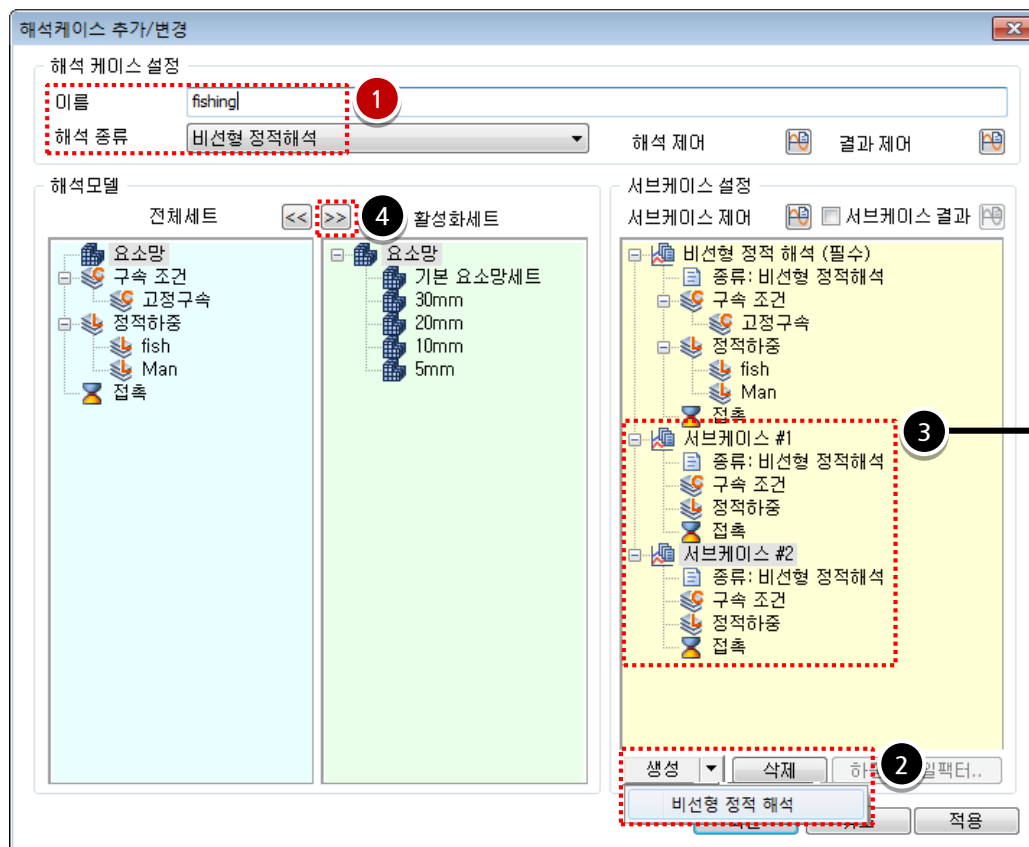
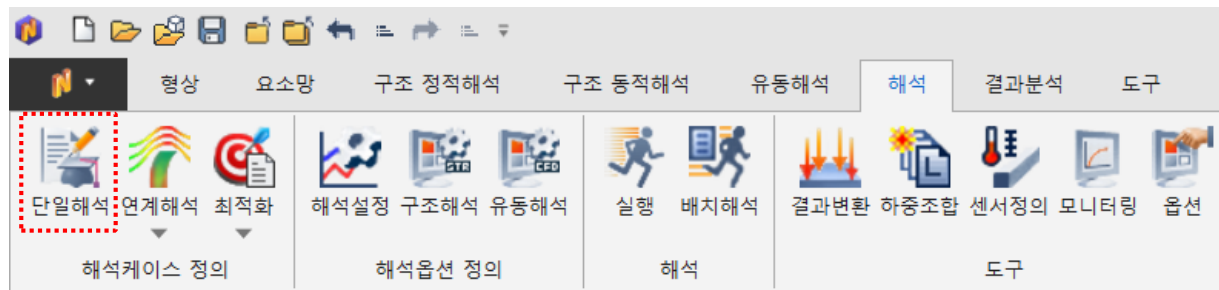
1. 이름: "fishing" 입력.

해석 종류: [비선형 정적해석] 선택.

2. 서브케이스 설정 >> 생성 >> 비선형 정적해석 클릭.

3. 2번 반복하여 총 3개의 서브케이스 생성

4. [>>] 버튼 클릭하여 모든 서브케이스에 구속조건, 하중조건을 활성화



💡 서브케이스를 생성하여 서로 다른 하중조건을 적용합니다.

작업순서

1. 비선형 정적 해석 (필수) 클릭 후,

F2 버튼을 누르고

서브케이스 이름 : "fish" 변경

2. fish 서브케이스에서, 하중세트

중 "Man" 를 전체세트로 drag&drop

3. 서브케이스#1 클릭 후,

F2 버튼을 누르고

서브케이스 이름 : "nibble" 변경

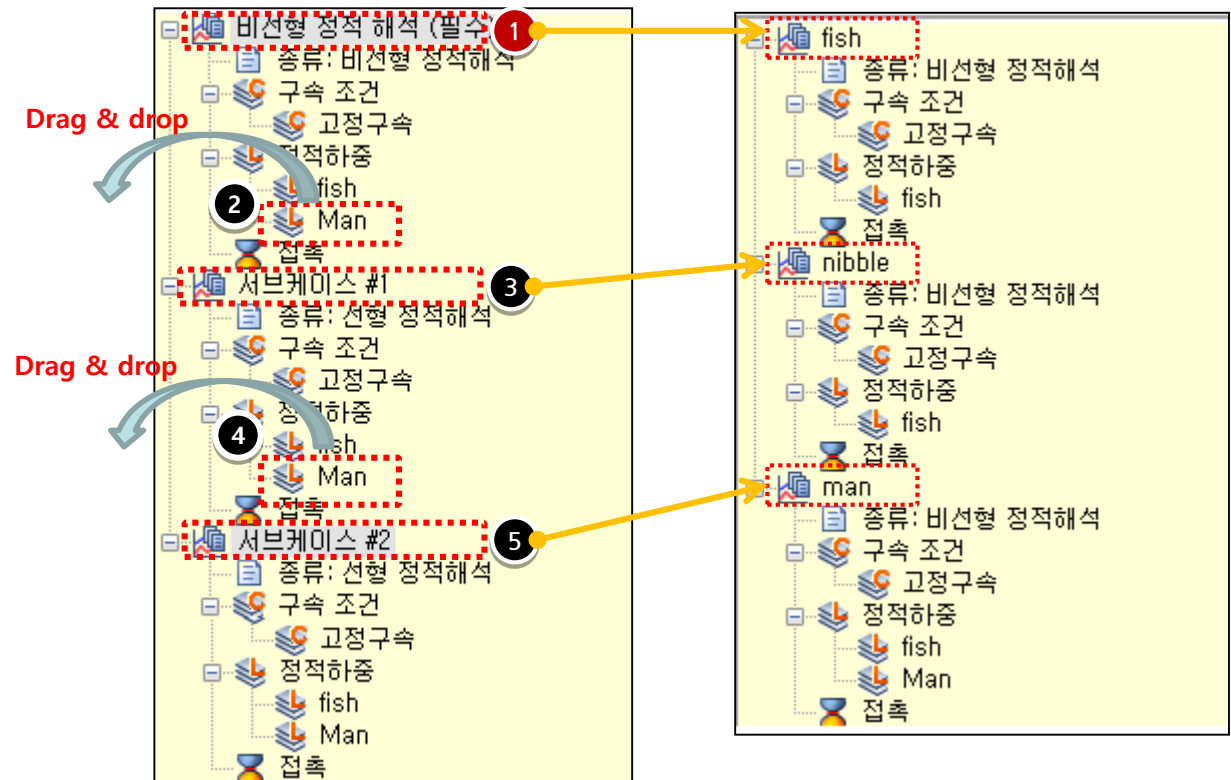
4. nibble 서브케이스에서, 하중세트

"man" 전체세트로 drag&drop

5. 서브케이스#2 클릭 후,

F2 버튼을 누르고

서브케이스 이름 : "man" 변경



💡 서브케이스를 생성하여 서로 다른 하중조건을 적용합니다.

작업순서

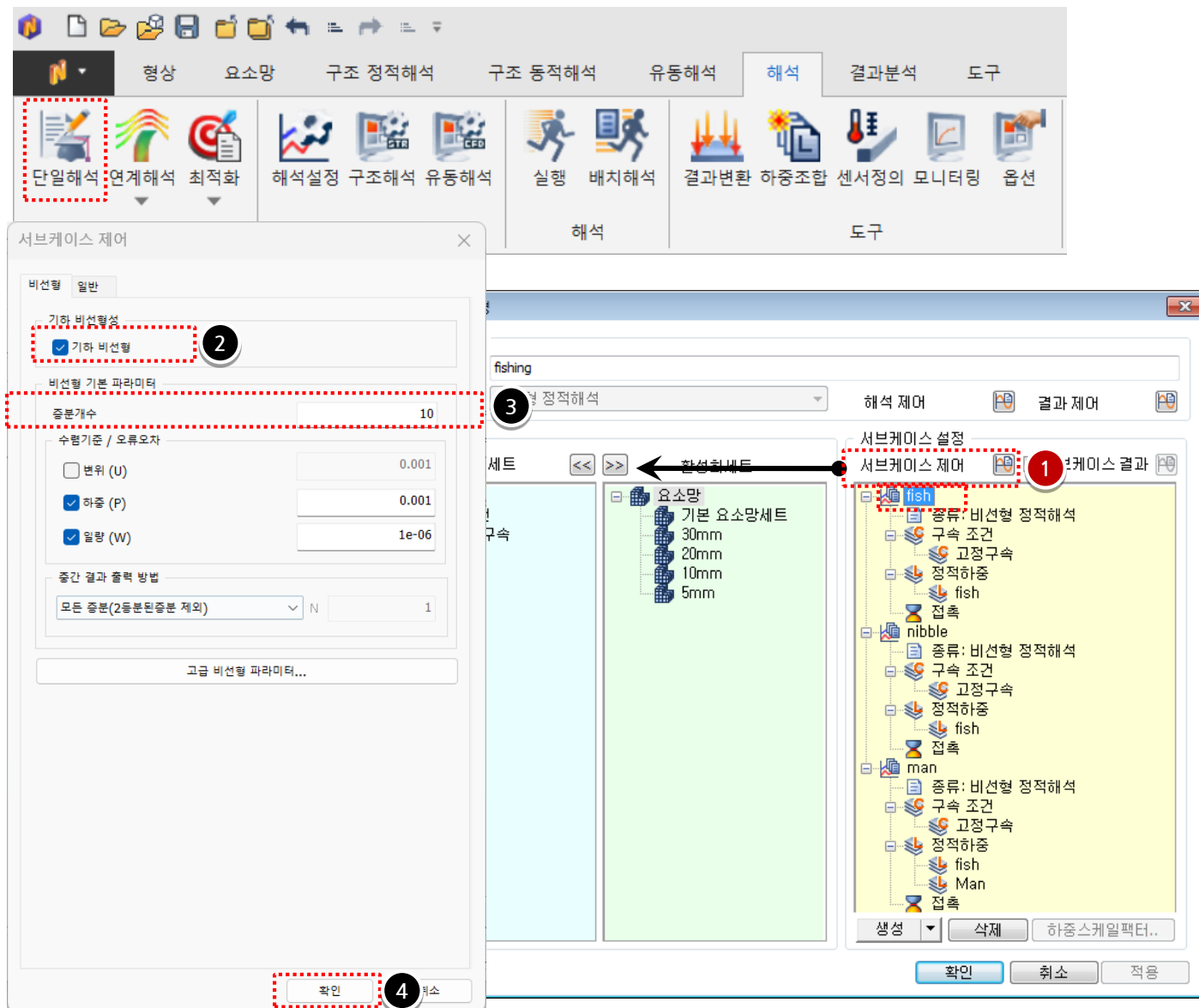
1. “fish” 선택 후, 서브케이스 제어

[] 클릭.

2. “기하비선형” 체크

3. 증분개수 : “10” 입력

4. [확인] 버튼 클릭.



The screenshot displays the Midas NFX software interface. The top menu bar includes options like '형상', '요소망', '구조 정적해석', '구조 동적해석', '유동해석', '해석', '결과분석', and '도구'. The '해석' menu is open, showing sub-options like '단일해석', '연계해석', '최적화', '해석설정', '구조해석', '유동해석', '실행', '배치해석', '결과변환', '하중조합', '센서정의', '모니터링', and '옵션'.

The '서브케이스 제어' (Subcase Control) dialog box is open, showing the '기하 비선형성' (Geometric Nonlinearity) section. The '기하 비선형' (Geometric Nonlinearity) checkbox is checked, and the '증분개수' (Number of Increments) is set to 10. The '확인' (OK) button is highlighted with a red dashed box and a circled '4'.

The main window shows the 'fish' subcase selected in the tree view. The '서브케이스 제어' (Subcase Control) button is highlighted with a red dashed box and a circled '1'. The '확인' (OK) button is also highlighted with a red dashed box and a circled '4'.

The 'fish' subcase is expanded, showing a tree structure of elements and subcases. The 'fish' subcase is highlighted with a red dashed box and a circled '1'. The '확인' (OK) button is highlighted with a red dashed box and a circled '4'.

작업순서

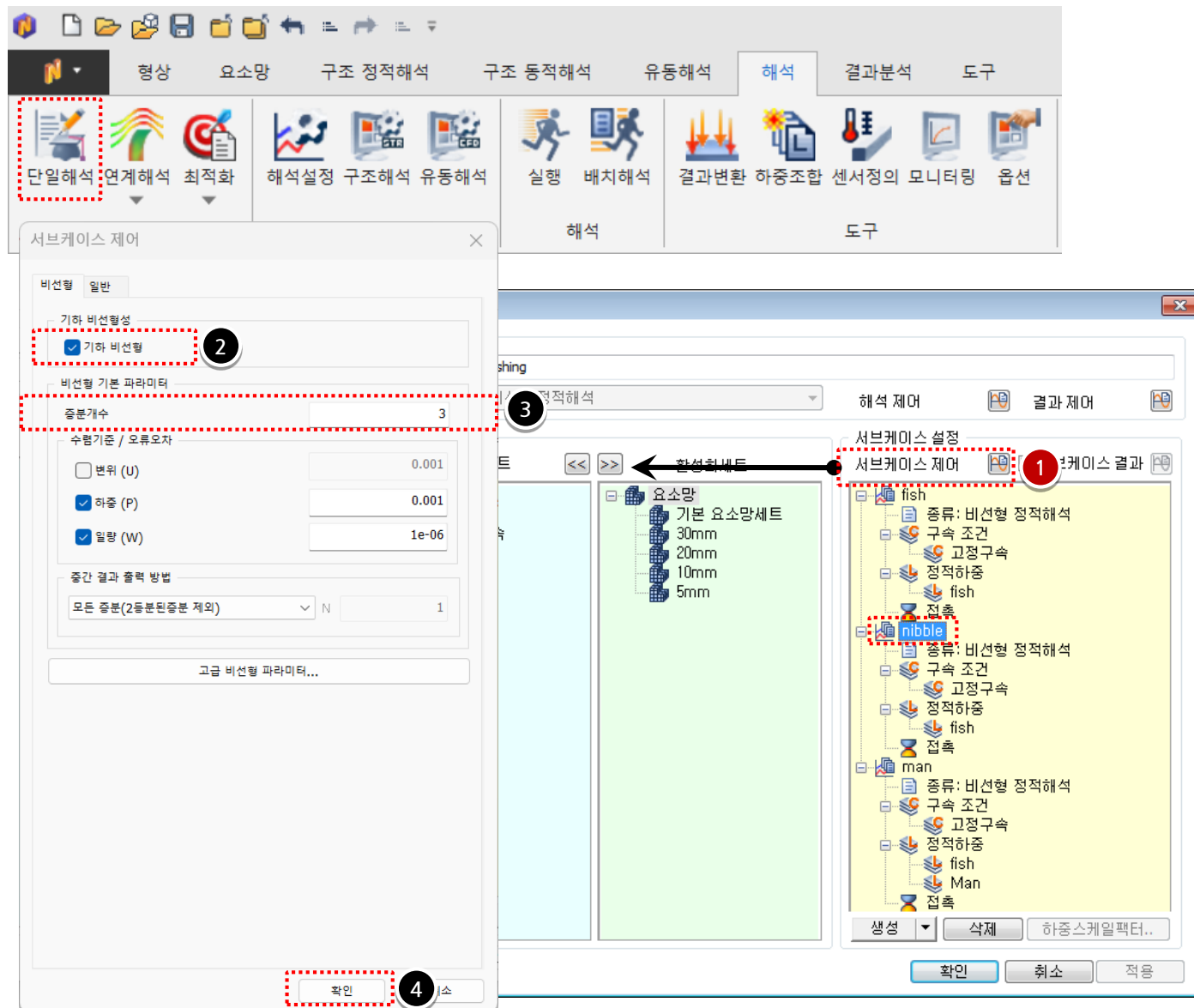
1. “nibble” 선택 후, 서브케이스 제어

[] 클릭.

2. “기하비선형” 체크

3. 증분개수 : “3” 입력

4. [확인] 버튼 클릭.



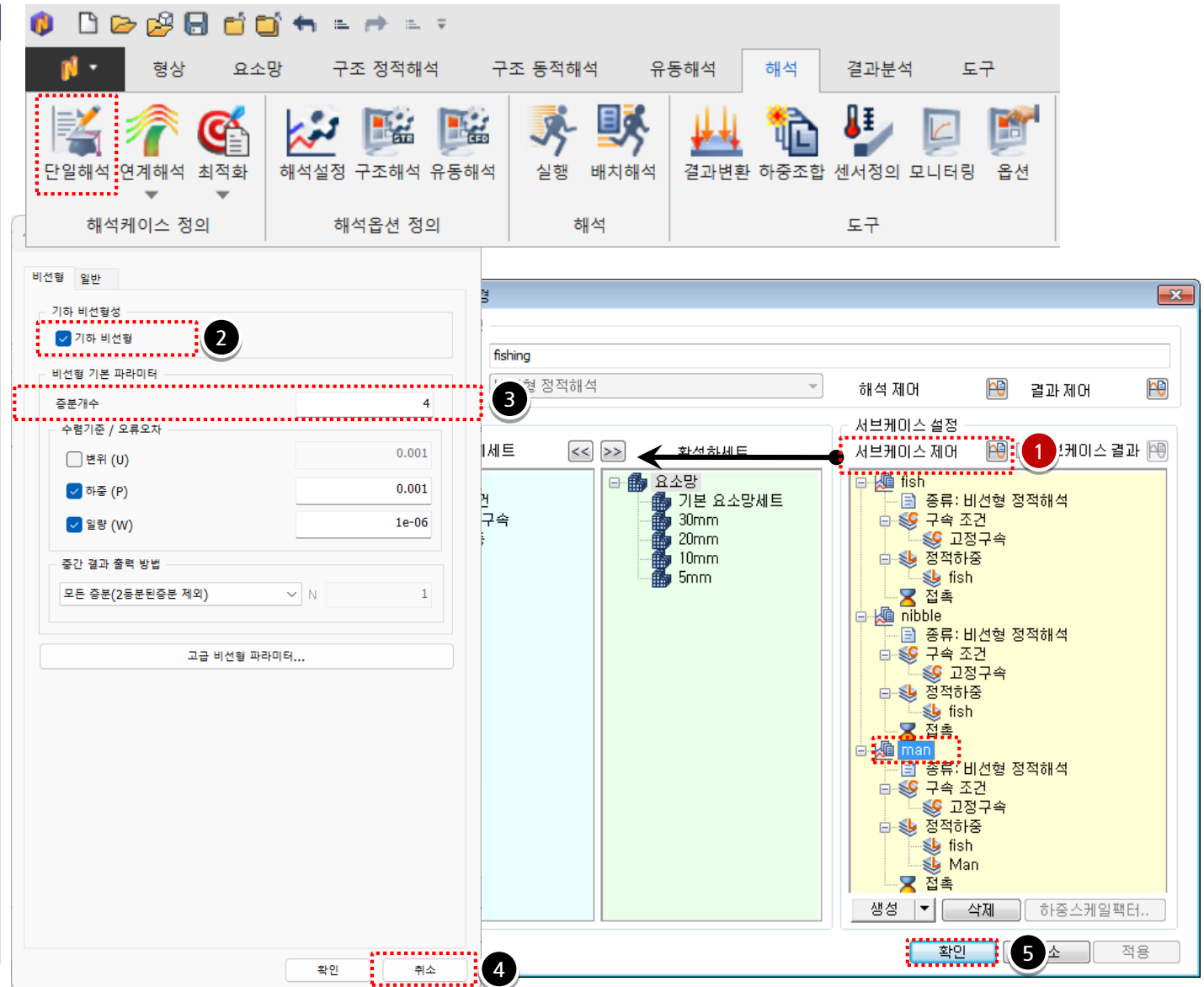
The screenshot shows the Midas NFX software interface. The main window displays a tree view of the analysis model. The 'nibble' element is selected, and the '서브케이스 제어' (Subcase Control) dialog box is open. The dialog box has several sections:

- 기하 비선형성 (Geometric Nonlinearity):** The '기하 비선형' (Geometric Nonlinear) checkbox is checked.
- 비선형 기본 파라미터 (Nonlinear Basic Parameters):** The '증분개수' (Number of Increments) is set to 3.
- 수렴기준 / 오류오차 (Convergence Criteria / Error/Deviation):** The '하중 (P)' (Load) and '일량 (W)' (Displacement) checkboxes are checked.
- 중간 결과 출력 방법 (Intermediate Result Output Method):** The '모든 증분(2등분된 증분 제외)' (All increments (except 2-part increments)) option is selected.

The '확인' (OK) button is highlighted at the bottom of the dialog box. The analysis tree on the right shows the 'nibble' element selected, and the '서브케이스 설정' (Subcase Settings) panel is visible.

작업순서

1. “man” 선택 후, 서브케이스 제어
2. “기하비선형” 체크
3. 증분개수 : “4” 입력
4. [확인] 버튼 클릭.
5. [확인] 버튼 클릭.



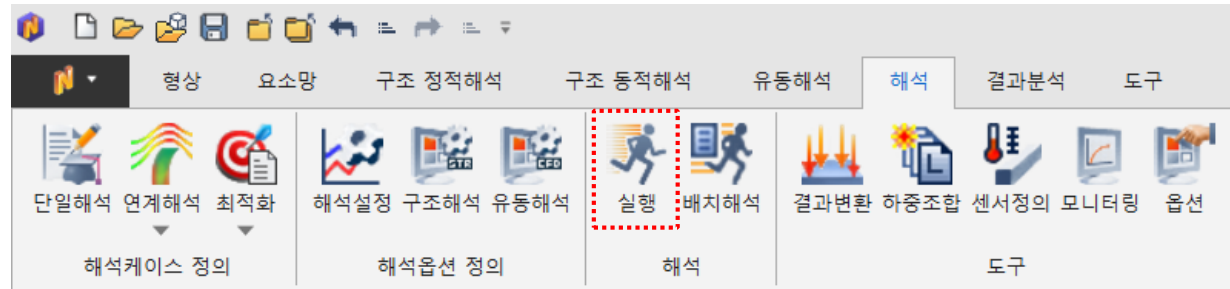
The screenshot shows the Midas NFX software interface. The top toolbar has tabs for '형상' (Geometry), '요소망' (Mesh), '구조 정적해석' (Structural Static Analysis), '구조 동적해석' (Structural Dynamic Analysis), '유동해석' (Fluid Analysis), '해석' (Analysis), '결과분석' (Result Analysis), and '도구' (Tools). The '해석' tab is active, showing a toolbar with icons for '단일해석' (Single Analysis), '연계해석' (Coupled Analysis), '최적화' (Optimization), '해석설정' (Analysis Settings), '구조해석' (Structural Analysis), '유동해석' (Fluid Analysis), '실행' (Execute), '배치해석' (Batch Analysis), '결과변환' (Result Conversion), '하중조합' (Load Combination), '센서정의' (Sensor Definition), '모니터링' (Monitoring), and '옵션' (Options).

The main workspace shows a tree view of the model. The 'man' element is selected. The '서브케이스 제어' (Subcase Control) dialog box is open, showing the '기하 비선형성' (Geometric Nonlinearity) section with the '기하 비선형' (Geometric Nonlinearity) checkbox checked. The '증분개수' (Increment Count) is set to 4. The '하중 (P)' and '일량 (W)' checkboxes are also checked. The '확인' (OK) button is highlighted with a red dashed box and a numbered circle 4.

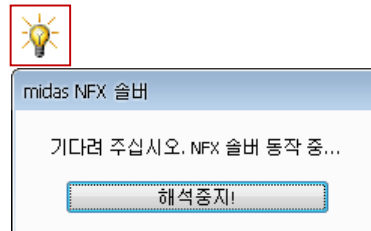
The '서브케이스 설정' (Subcase Settings) dialog box is also open, showing the '서브케이스 제어' (Subcase Control) section with the 'man' element selected. The '확인' (OK) button is highlighted with a red dashed box and a numbered circle 5.

작업순서

1. [확인] 버튼 클릭.



💡 해석을 실행하면 midas NFX 슬버가 작동됩니다. [해석중지!] 버튼을 클릭하면 해석이 중지됩니다.



작업순서

1. 해석 및 결과 작업트리에서 전체 범위

더블 클릭

2. 해석 및 결과 >> 일반 >> 실제스케일

변경

3. [] (멀티-스텝 애니메이션 녹화) 클릭

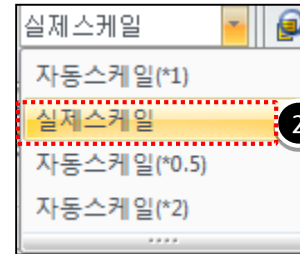
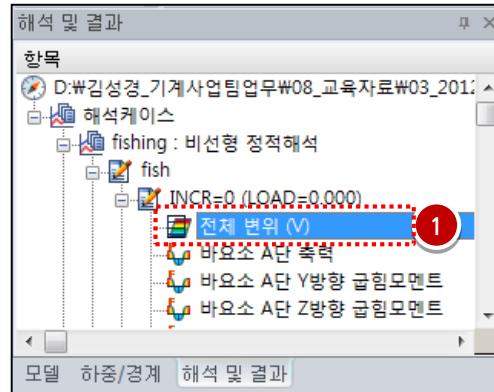
4. [] 클릭


5. “모든 서브케이스” 체크


6. 전부선택 클릭

7. [확인] 버튼 클릭

8. [] (재생) 클릭



 멀티-스텝 애니메이션 녹화를 이용하면 스텝별 결과를 애니메이션으로 확인할 수 있습니다. (자동으로 전체 스텝 결과에 체크되어 있습니다.)

애니메이션 결과 확인이 끝나면 [] 버튼을 클릭하여 애니메이션 재생을 종료해 주어야 합니다. 이는 다른 후처리 작업 시 발생할 수 있는 조작의 불편함을 최소화하기 위한 작업입니다.

작업순서

(00)

개요

➤ 선형정적해석

- 단위 : N, mm
- follower_force.nfx

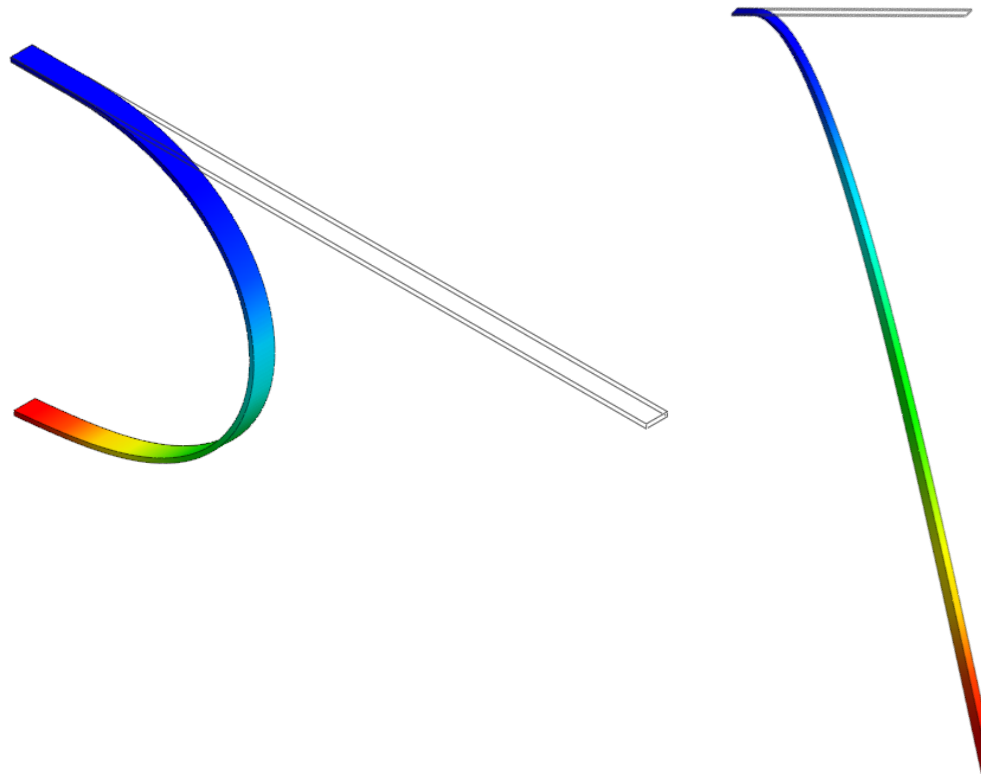
➤ 경계조건과 하중조건

- 경계조건 (고정구속)
- 종동력
- 집중하중

➤ 결과확인

- 전체 변위
- 애니메이션

Follower Force

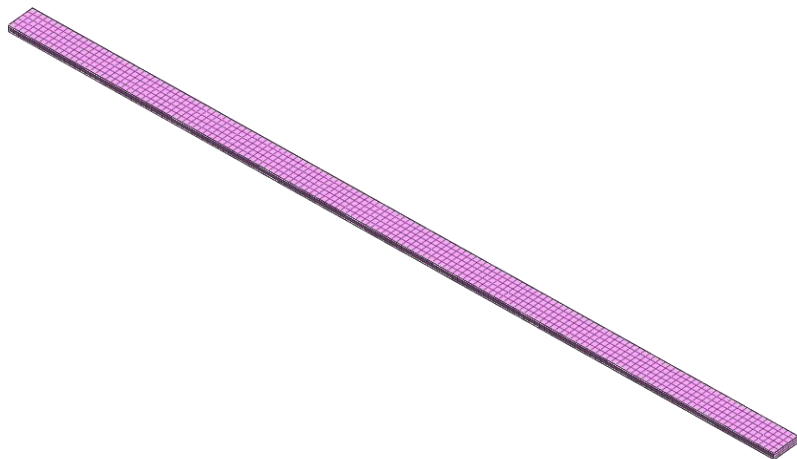


따라하기 목적

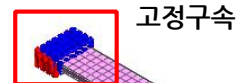
- 종동하중과 집중하중의 차이점 이해
- 기하비선형 on/off에 따른 결과비교
 - 기하비선형을 고려한 경우와, 고려하지 않은 경우 어떤 차이가 발생하는지 살펴봅니다.

해석 개요

➢ 대상 모델



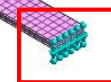
➢ 서브케이스 정의




고정구속

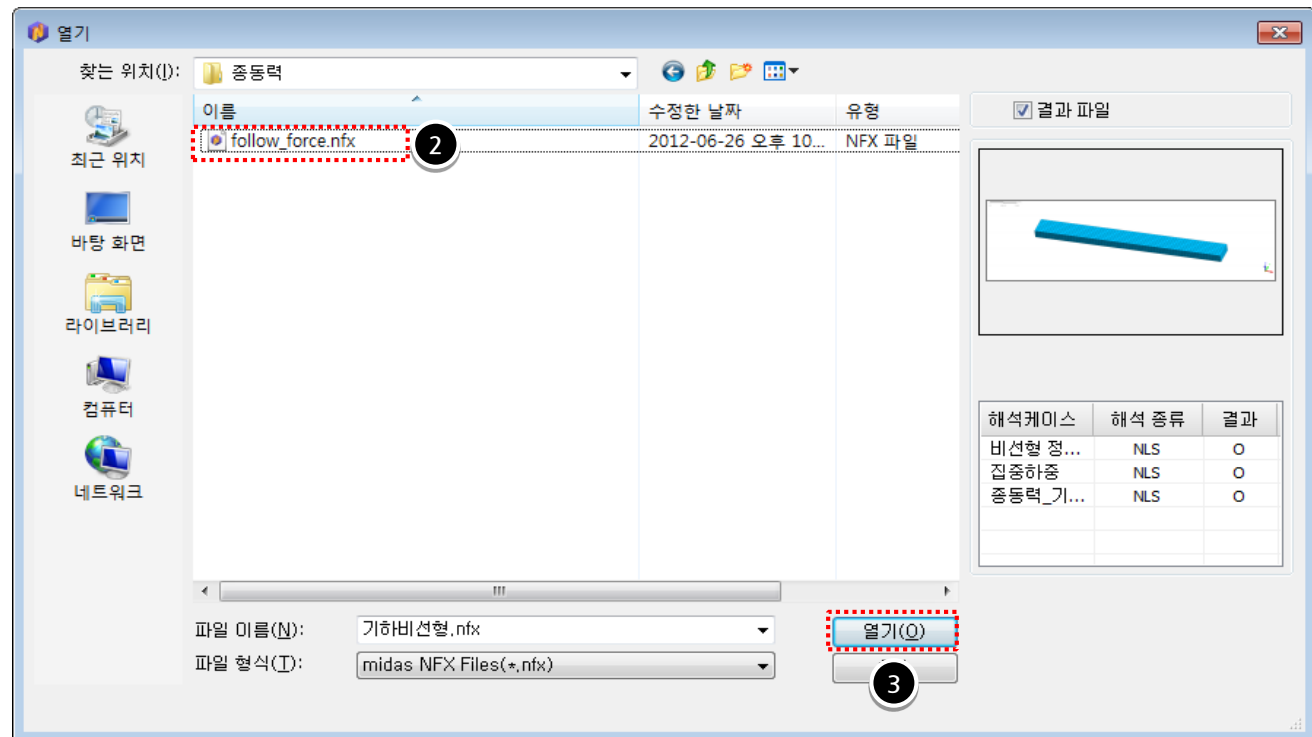
하중조건

1. 기하비선형 ON/OFF 고려한 종동력
2. 기하비선형 ON/OFF 고려한 집중하중




작업순서

1. [ (열기) 클릭.
2. "follow_force.nfx" 선택.
3. [열기] 버튼 클릭.



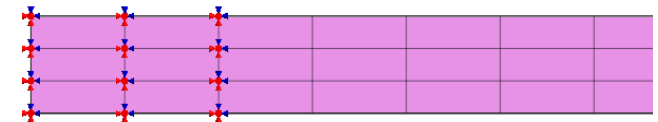
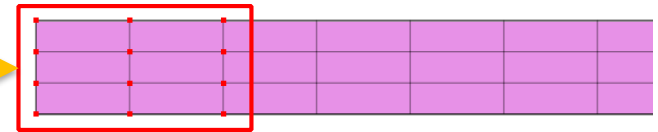
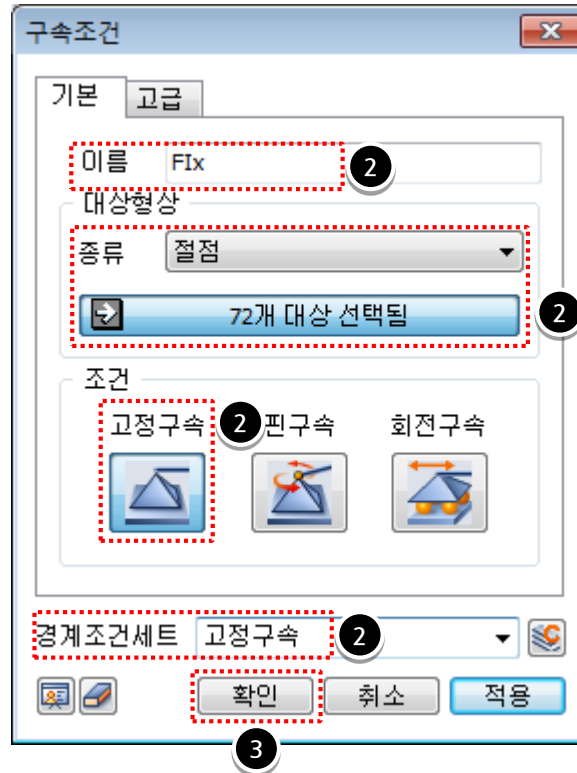
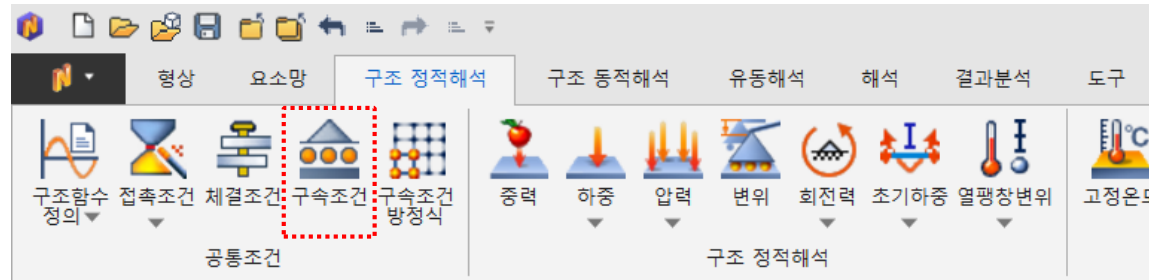
작업순서

1. [] (정면 보기) 클릭.

2. 구속조건 입력

이름	Fix
대상종류	절점
대상선택	72개 선택(그림참조)
조건	고정구속

3. [확인] 버튼 클릭.

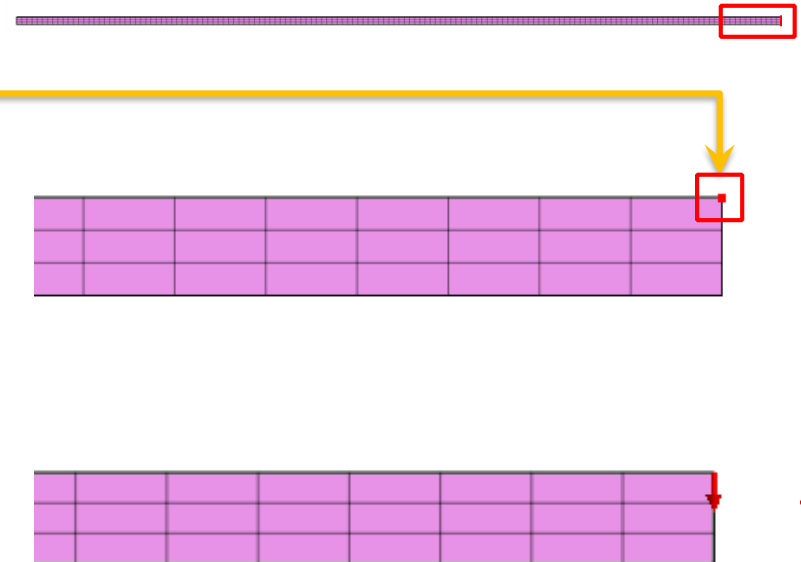
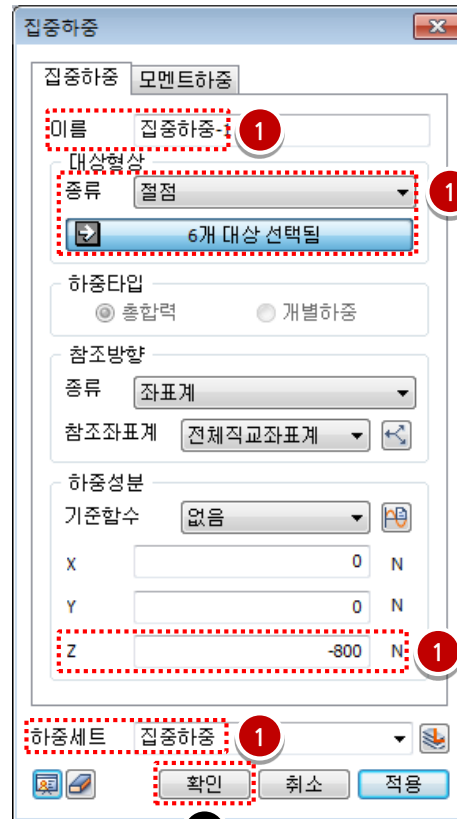
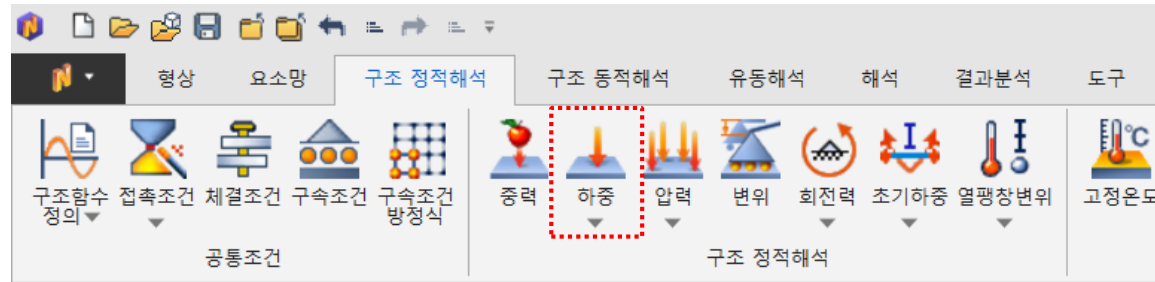


작업순서

1. 집중하중 입력

이름	집중하중
대상종류	절점
대상선택	6개 선택(그림참조)
하중(Z-축)	-800
하중세트	집중하중

2. [확인] 버튼 클릭.

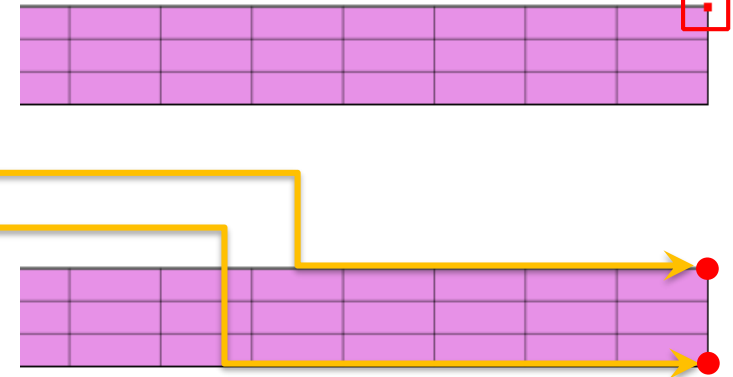
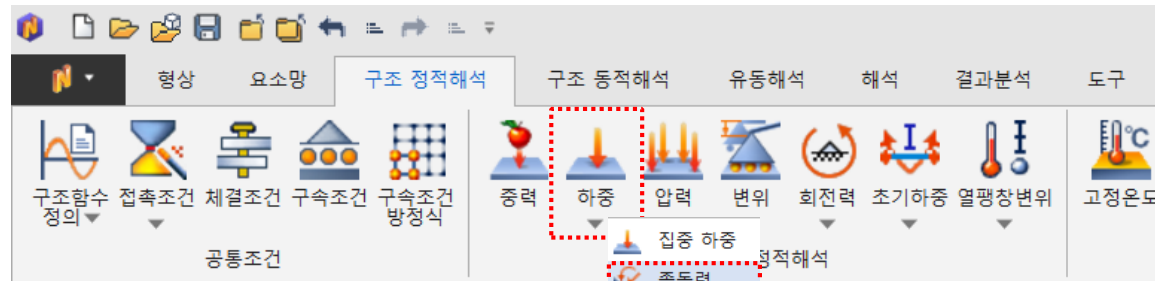


작업순서

1. 종동력 입력

이름	종동력
대상종류	절점
대상선택	6개 선택(그림참조)
시작 절점 선택	그림참조
끝 절점 선택	그림참조
힘	800N
하중세트	종동력

2. [확인] 버튼 클릭.



작업순서

1. 이름: “중동력_기하비선형on” 입력.

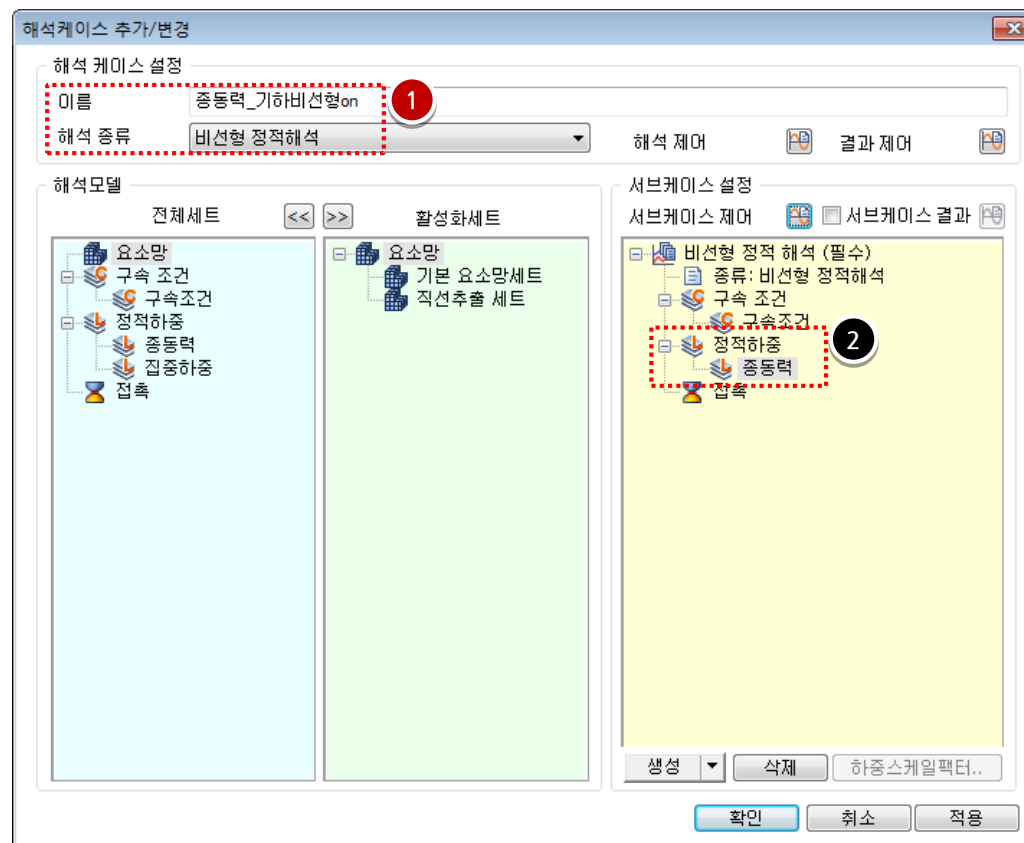
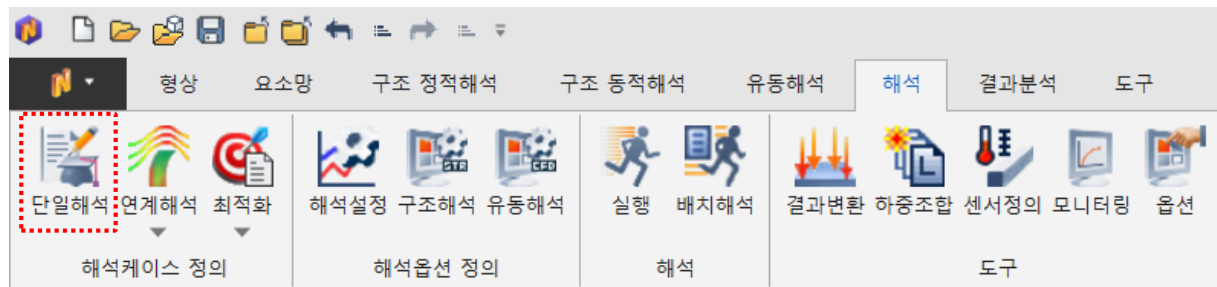
해석 종류: [비선형 정적해석] 선택.

2. 서브케이스 설정창

비선형 정적해석 (필수)


>> 정적하중 >> 중동력 활성화

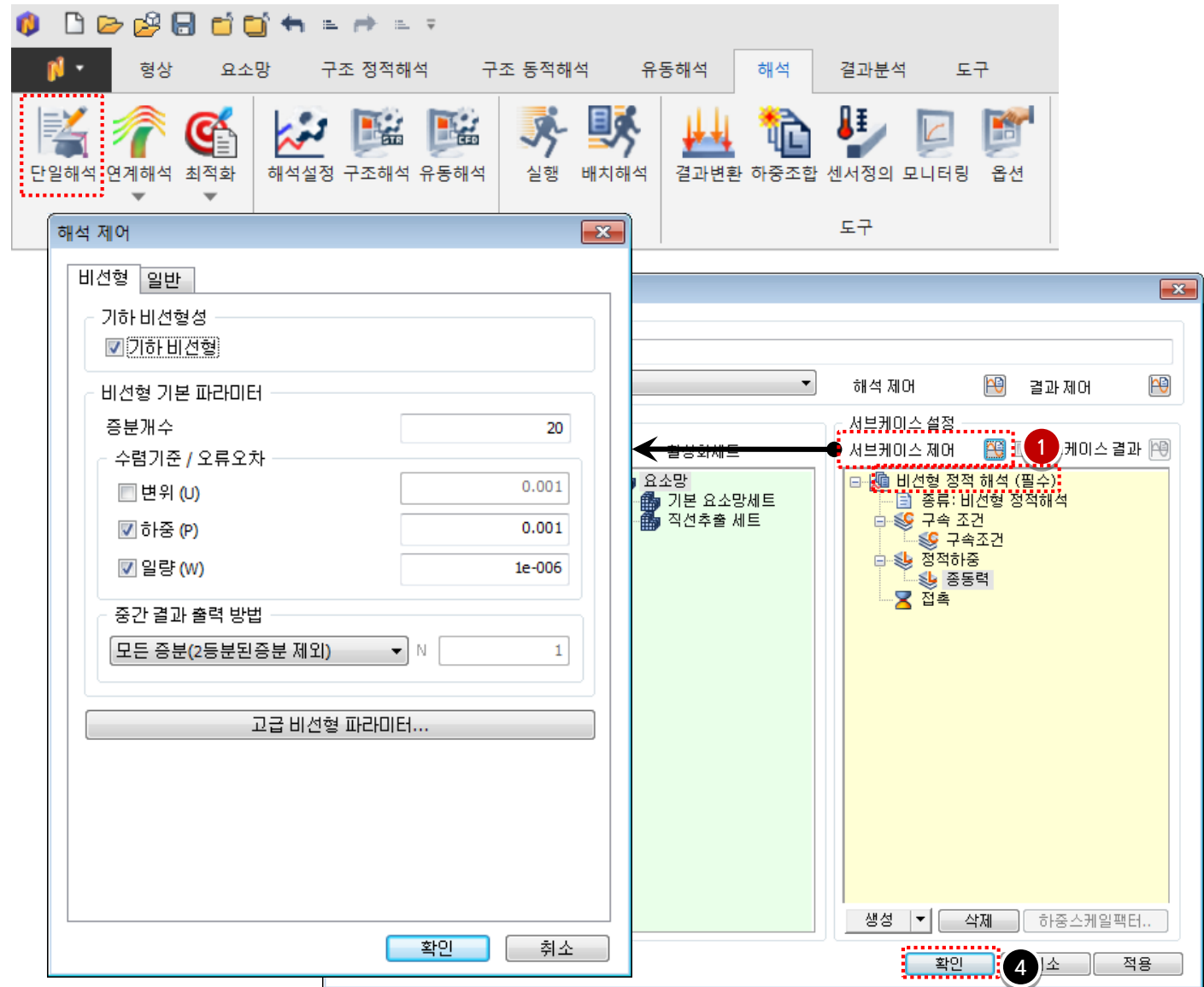
(집중하중을 전체세트로 drag&drop)



💡 전체세트와 서브케이스 사이에 하중 조건 들은 Drag&drop을 이용하여 추가하거나 삭제할 수 있습니다.

작업순서

1. 비선형 정적 해석(필수) 선택 후,
서브케이스 제어 [] 클릭.
2. “기하비선형” 체크
3. [확인] 버튼 클릭.
4. [확인] 버튼 클릭.



The screenshot displays the Midas NFX software interface. The top menu bar includes options like '형상', '요소망', '구조 정적해석', '구조 동적해석', '유동해석', '해석', '결과분석', and '도구'. The '해석' menu is active, showing a toolbar with icons for '단일해석', '연계해석', '최적화', '해석설정', '구조해석', '유동해석', '실행', '배치해석', '결과변환', '하중조합', '센서정의', '모니터링', and '옵션'.

The '해석 제어' (Analysis Control) dialog box is open, showing the '비선형' (Nonlinear) tab. Under '기하비선형성' (Geometric Nonlinearity), the '기하비선형성' (Geometric Nonlinearity) checkbox is checked. The '비선형 기본 파라미터' (Nonlinear Basic Parameters) section includes:

- 중분개수 (Intermediate Steps): 20
- 수렴기준 / 오류오차 (Convergence Criteria / Error):
 - 변위 (U) (Displacement): 0.001
 - 하중 (P) (Load): 0.001
 - 일량 (W) (Energy): 1e-006
- 중간 결과 출력 방법 (Intermediate Results Output Method): 모든 중분(2등분된중분 제외) (All Intermediate Steps (excluding 2-step division))
- N: 1

 A button labeled '고급 비선형 파라미터...' (Advanced Nonlinear Parameters...) is visible at the bottom of the dialog.

The '서브케이스 제어' (Subcase Control) panel is also visible, showing a tree view of subcases. The '비선형 정적 해석 (필수)' (Nonlinear Static Analysis (Required)) subcase is selected. A red dashed box highlights the '서브케이스 제어' (Subcase Control) button in the top right corner of the panel, with a red circle containing the number '1' next to it. An arrow points from this button to the '비선형 정적 해석 (필수)' subcase in the tree view. At the bottom of the panel, the '확인' (OK) button is highlighted with a red dashed box and a red circle containing the number '4'.

작업순서

1. 이름: “중동력_기하비선형off” 입력.

해석 종류: [비선형 정적해석] 선택.

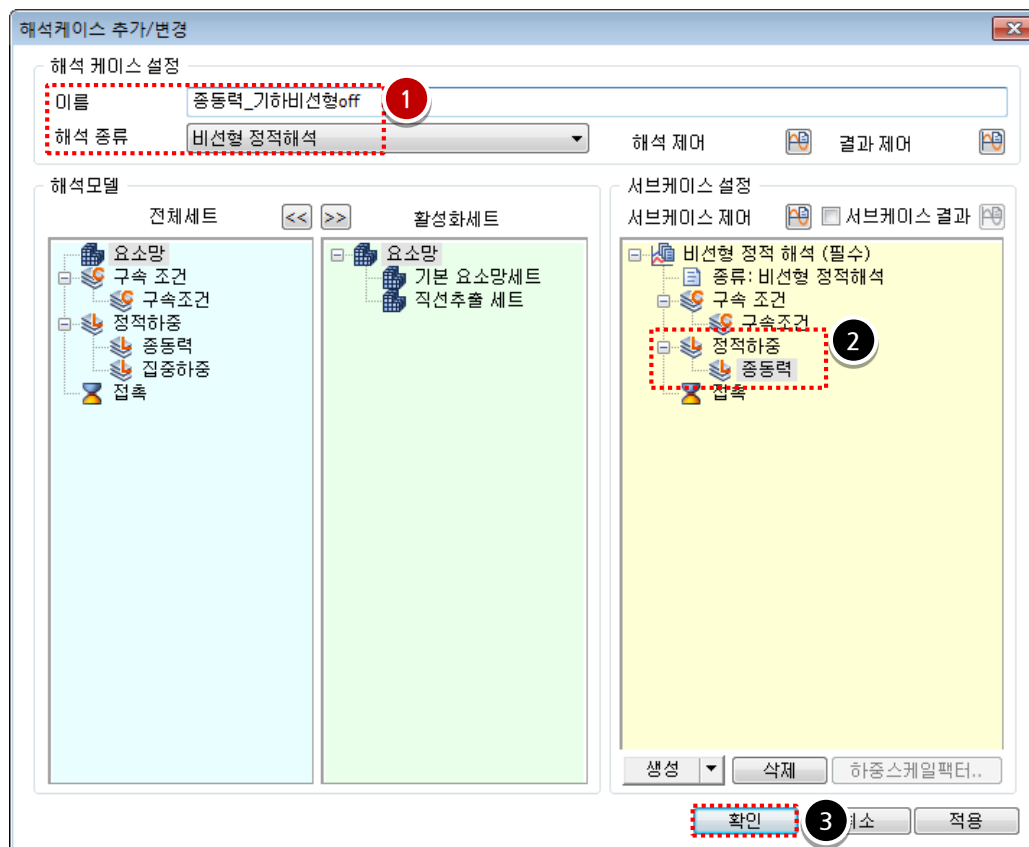
2. 서브케이스 설정창

비선형 정적해석 (필수)

>> 정적하중 >> 중동력 활성화

(집중하중을 전체세트로 drag&drop)

3. [확인] 버튼 클릭.



💡 전체세트와 서브케이스 사이에 하중 조건 들은 Drag&drop을 이용하여 추가하거나 삭제할 수 있습니다.

작업순서

1. 이름: “집중하중_기하비선형on” 입력.

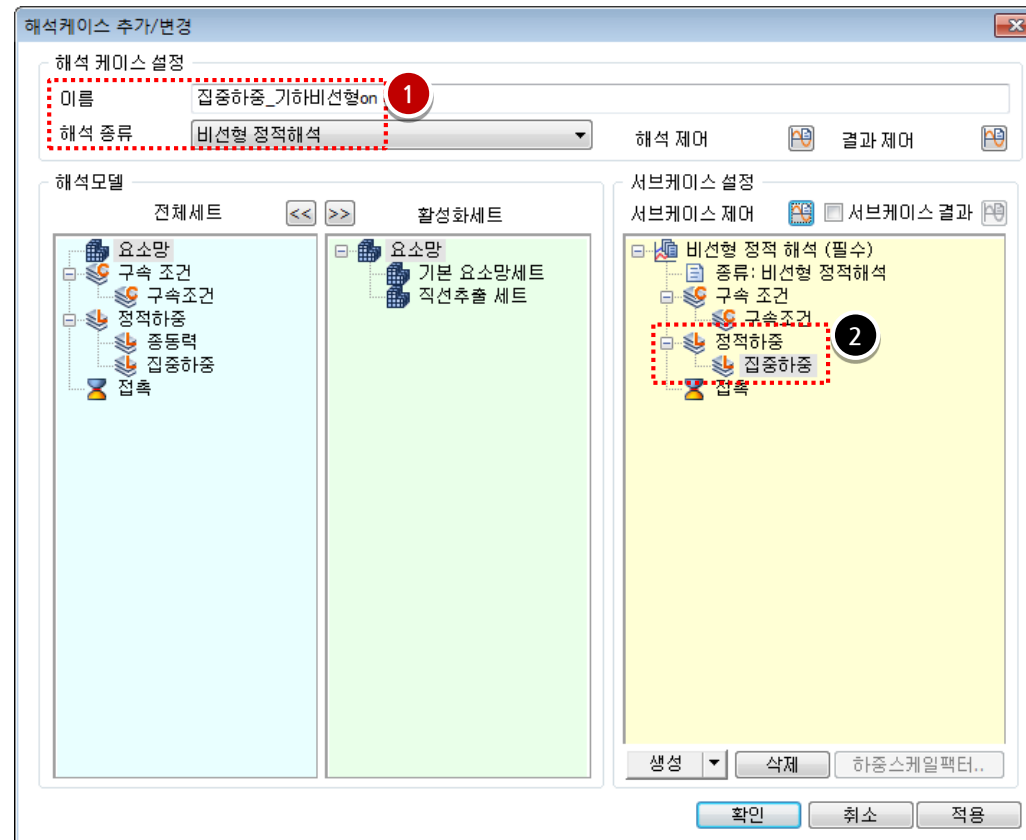
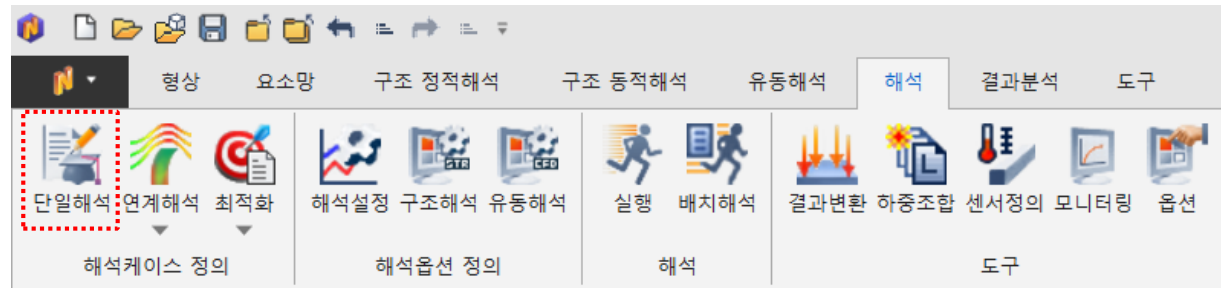
해석 종류: [비선형 정적해석] 선택.

2. 서브케이스 설정창

비선형 정적해석 (필수)


>> 정적하중 >> 집중하중 활성화

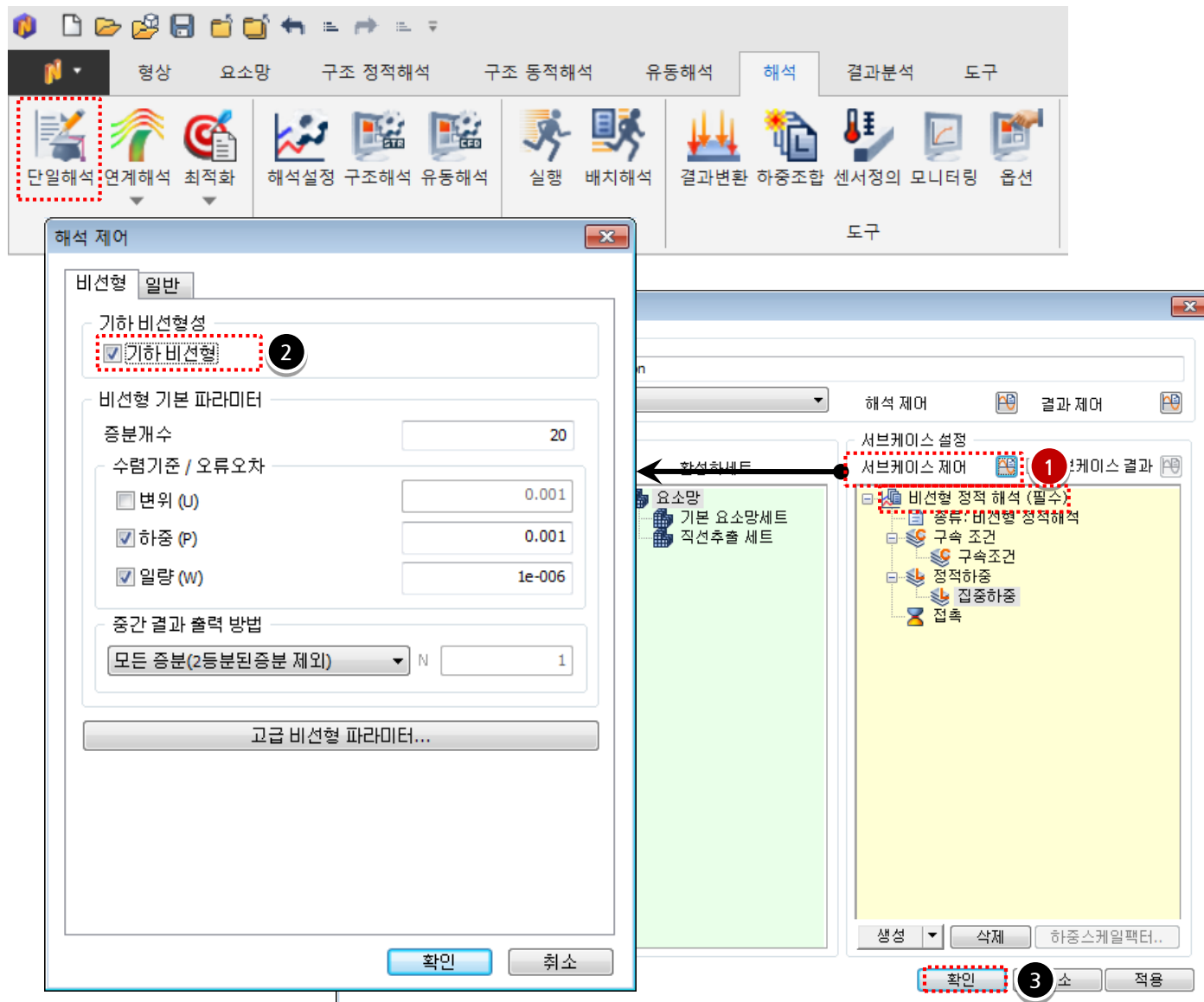
(중동력을 전체세트로 drag&drop)



💡 전체세트와 서브케이스 사이에 하중 조건 들은 Drag&drop을 이용하여 추가하거나 삭제할 수 있습니다.

작업순서

1. 비선형 정적 해석(필수) 선택 후,
서브케이스 제어 [] 클릭.
2. “기하비선형” 체크
3. [확인] 버튼 클릭.
4. [확인] 버튼 클릭.



The screenshot shows the software interface with the '해석 제어' (Analysis Control) dialog box open. The '비선형' (Nonlinear) tab is selected, and the '기하비선형성' (Geometric Nonlinearity) section is expanded. The '기하비선형' (Geometric Nonlinearity) checkbox is checked and highlighted with a red dashed box and a circled '2'. Below this, the '비선형 기본 파라미터' (Nonlinear Basic Parameters) section shows '충분개수' (Number of Increments) set to 20, and '수렴기준 / 오류오차' (Convergence Criteria / Error Tolerance) with '하중 (P)' (Load) checked and set to 0.001, and '일량 (W)' (Displacement) checked and set to 1e-006. The '중간 결과 출력 방법' (Intermediate Result Output Method) is set to '모든 증분(2등분된 증분 제외)' (All Increments (excluding 2-part increments)) with 'N' set to 1. The '고급 비선형 파라미터...' (Advanced Nonlinear Parameters...) button is visible at the bottom of the dialog.

In the background, the '서브케이스 제어' (Subcase Control) panel is visible. The '비선형 정적 해석 (필수)' (Nonlinear Static Analysis (Required)) subcase is selected and highlighted with a red dashed box and a circled '1'. The '확인' (OK) button at the bottom right of the dialog is also highlighted with a red dashed box and a circled '3'.

작업순서

1. 이름: “집중하중_기하비선형off” 입력.

해석 종류: [비선형 정적해석] 선택.

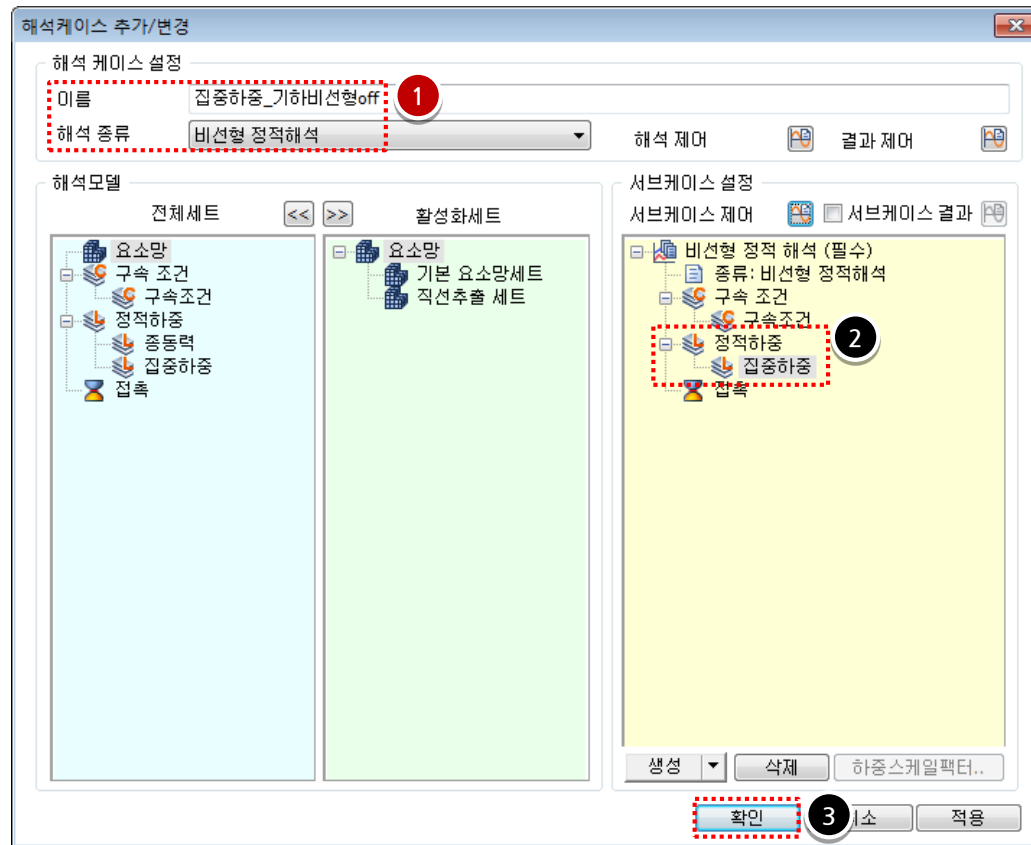
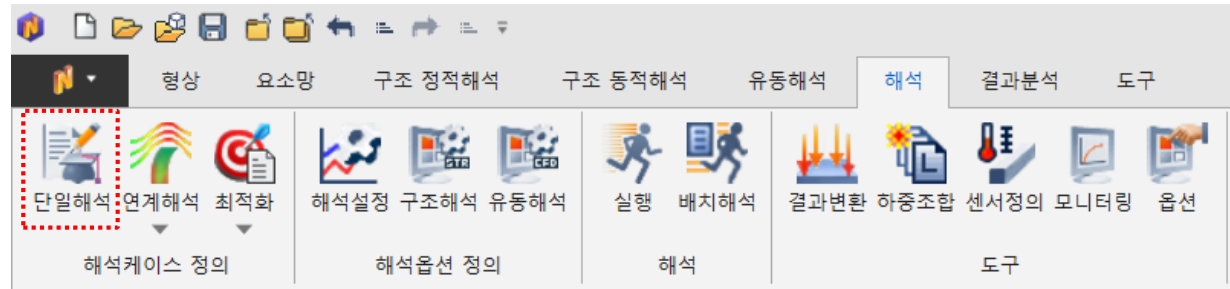
2. 서브케이스 설정창

비선형 정적해석 (필수)

>> 정적하중 >> 집중하중 활성화

(중동력을 전체세트로 drag&drop)

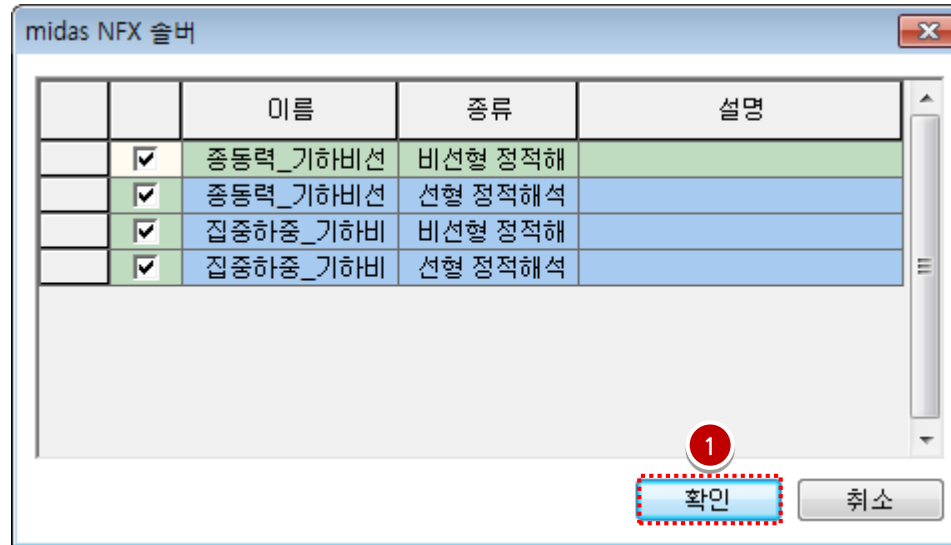
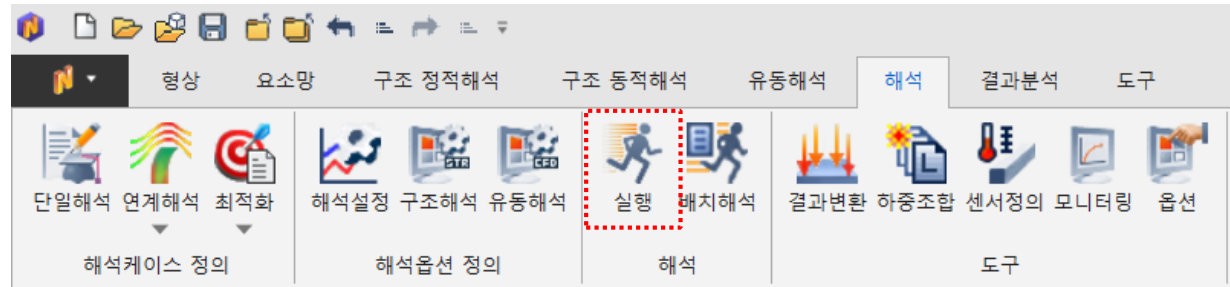
3. [확인] 버튼 클릭



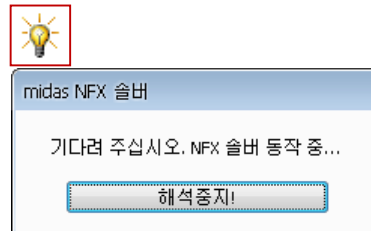
💡 전체세트와 서브케이스 사이에 하중 조건 들은 Drag&drop을 이용하여 추가하거나 삭제할 수 있습니다.

작업순서

1. [확인] 버튼 클릭.



💡 해석을 실행하면 midas NFX 슬버가 작동됩니다. **[해석중지!]** 버튼을 클릭하면 해석이 중지됩니다.



작업순서

1. 해석 및 결과 >> 해석케이스 >>

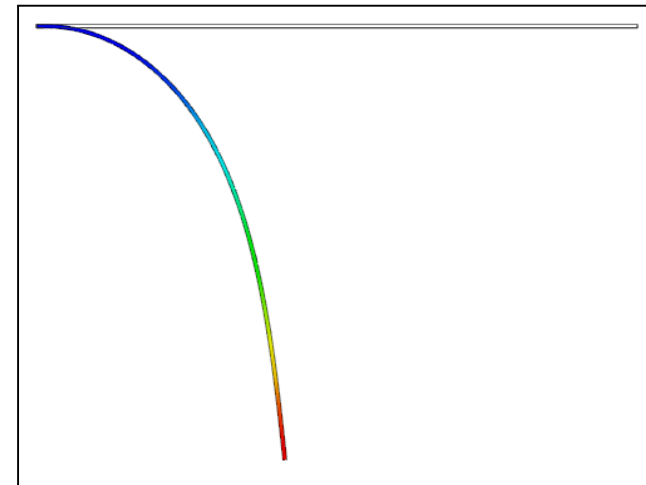
INCR=22 (LOAD=1.000) >>

전체변위 더블클릭

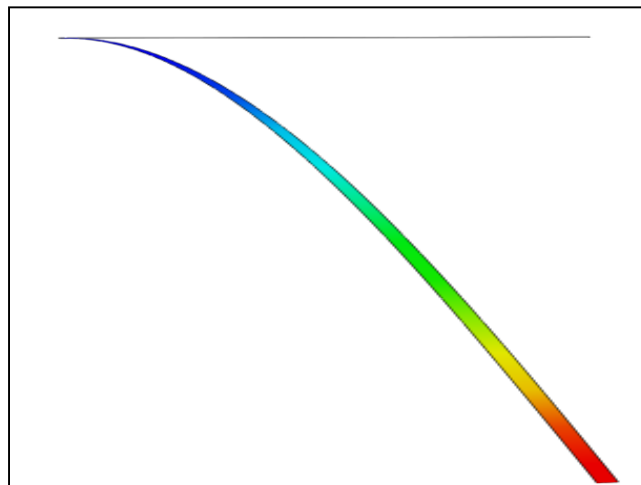
<중동력_기하비선형ON>



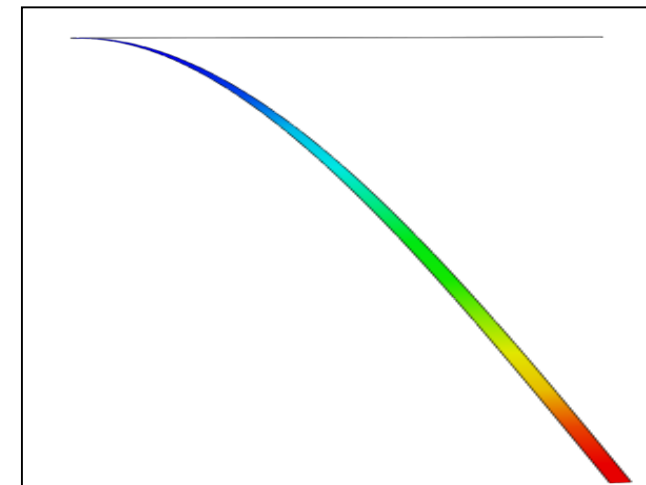
<집중하중_기하비선형ON>



<중동력_기하비선형OFF>



<집중하중_기하비선형OFF>

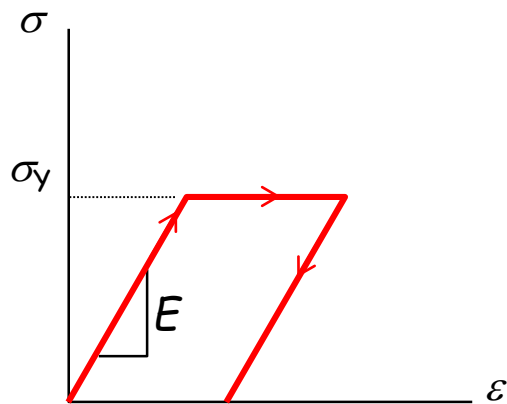


재료비선형(1) - 탄소성

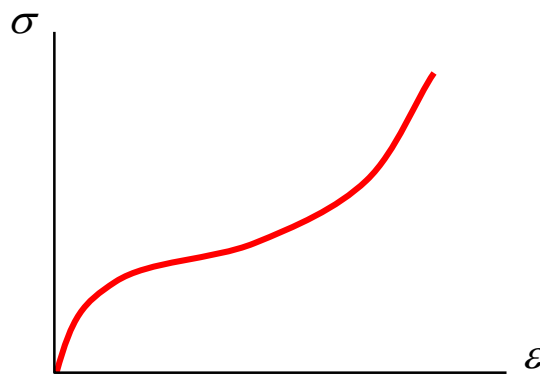
재료비선형 개요

- ✓ 선형 해석에서는 재료의 범위가 탄성범위 안에(고무재료를 제외) 있다고 가정
- ✓ 재료의 탄성 이후의 거동(소성거동)을 고려하여 구조물의 비선형적 거동을 보기 위해서 재료비선형 해석이 필요함

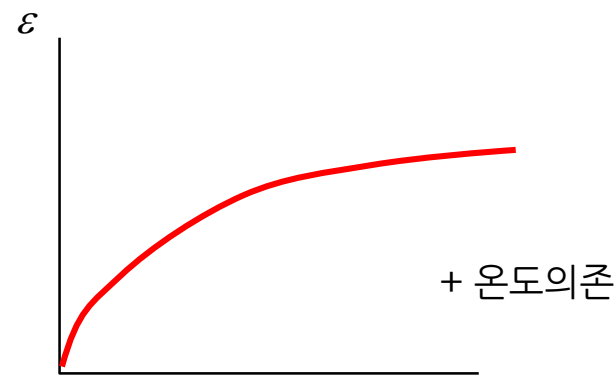
재료 비선형 재료모델의 종류



탄소성 모델



초탄성(비선형 탄성) 모델

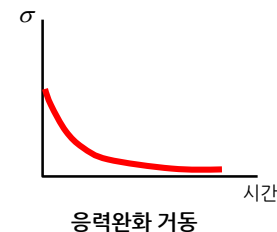


크리프 모델

시간

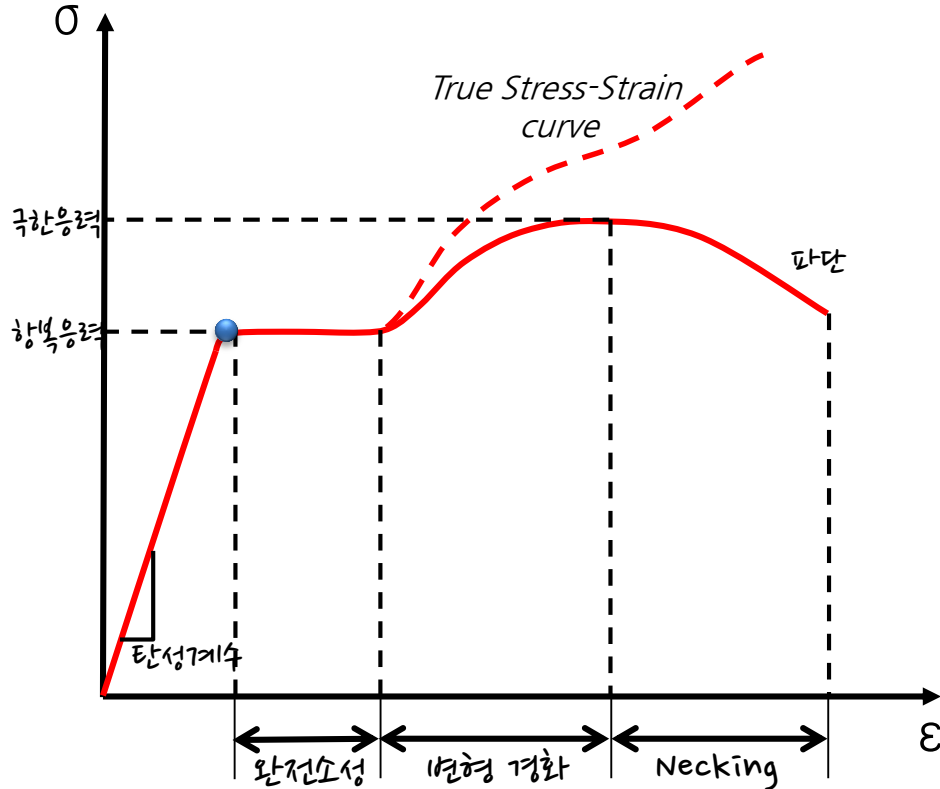
+ 온도의존

→ 적절한 재료모델을 선택하는 것이 중요하다



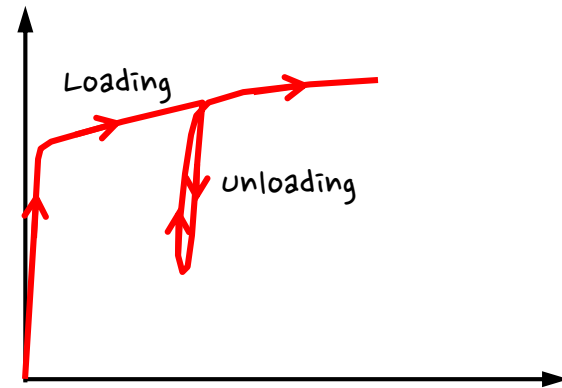
응력완화 거동

탄소성 모델의 특징



➤ 단축 인장 실험에 의한 응력-변형률 그래프

➤ 주기적인 하중에 의한 특성을 고려해야 함
(반복하중 하에서는 응력-변형률 경동이 달라져 재료의 특성이 변하게 되므로)



※ 만약,

주기적인 하중이 없으면 굳이 경화모델을 고려할 필요가 있을까??

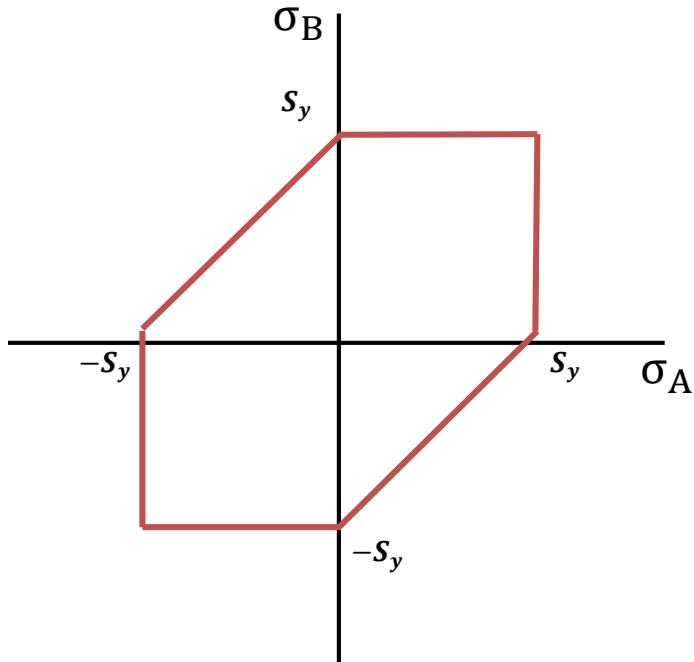
➔ 경화는 주기적인 하중과 무관하게 발생함.

항복기준

- ✓ TRESCA 모델 (최대전단응력 이론)

최대 전단응력 \geq 단순 인장시험 항복값 $\frac{1}{2}$

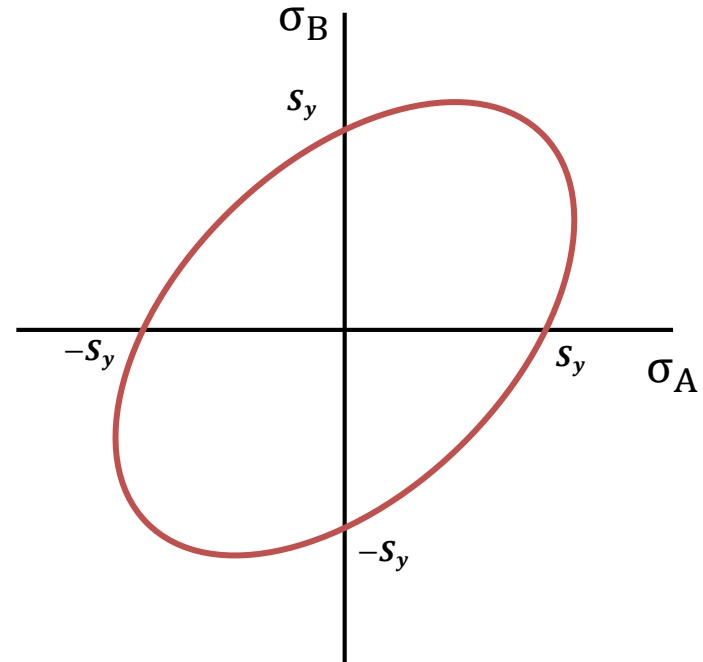
$$\tau_{\max} \geq \frac{S_y}{2}$$



- ✓ Von-Mises 모델 (비틀림 에너지 이론)

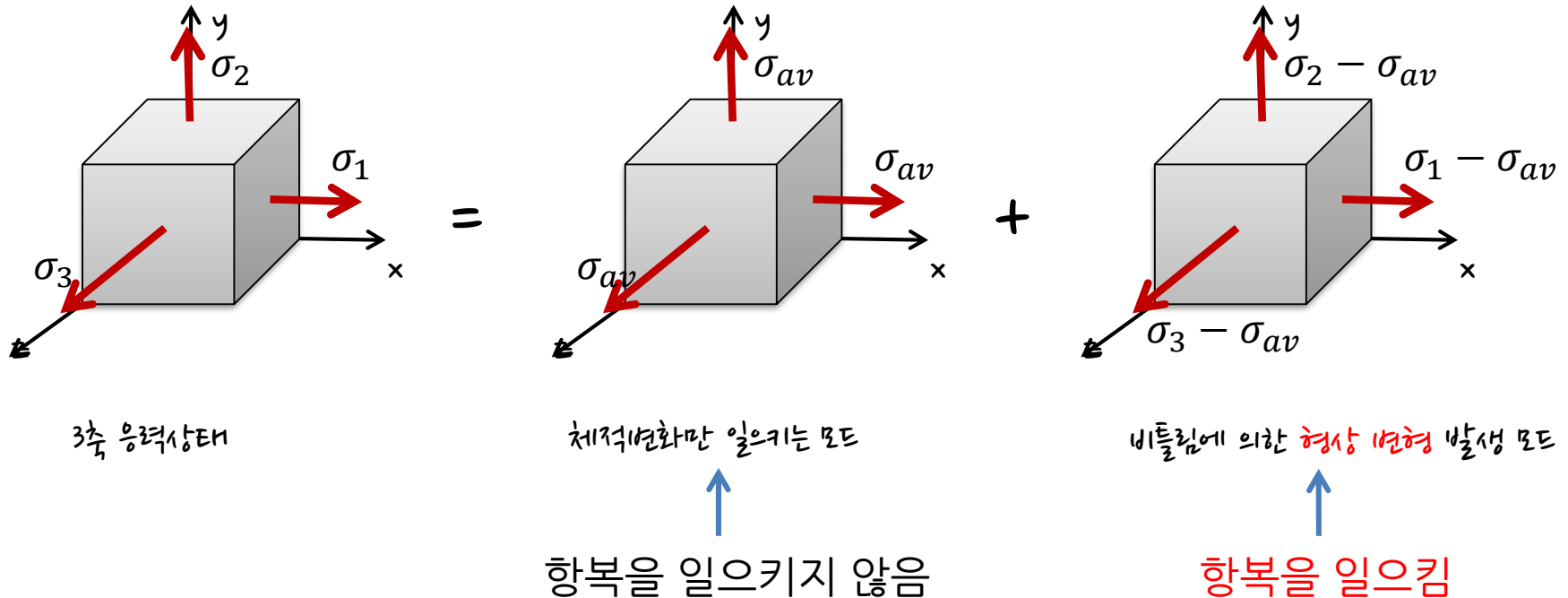
3축 응력상태 **형상 변형에너지** \geq
단순 인장시험 **항복발생시, 변형에너지**

$$\sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}} \geq S_y$$



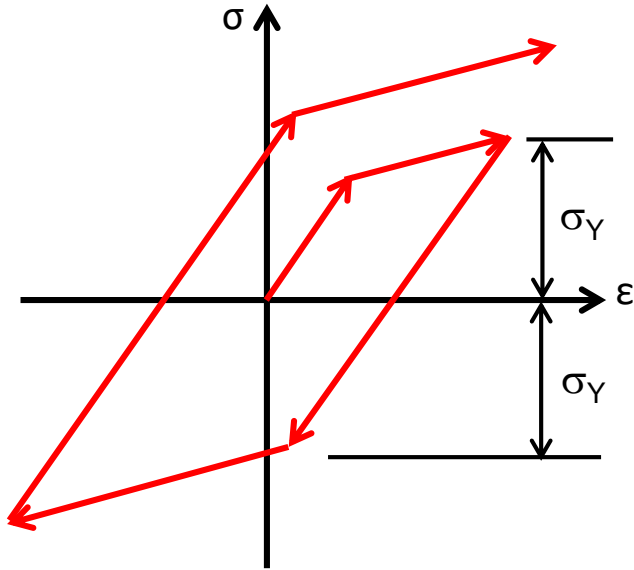
형상 변형 에너지

3축 응력상태에서 항복을 일으키는 원인은 단순 체적변화가 아닌 비틀림에 의한 형상 변형 때문이다.



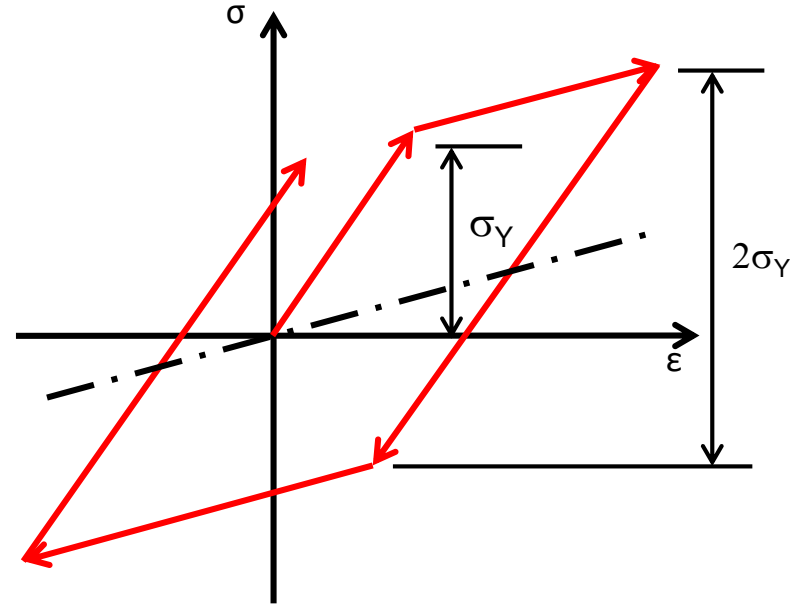
경화모델

✓ 등방성(Isotropic) 경화모델



- 항복 응력이 인장과 압축에 같은 비율로 증가

✓ 이동성(Kinematic) 경화모델

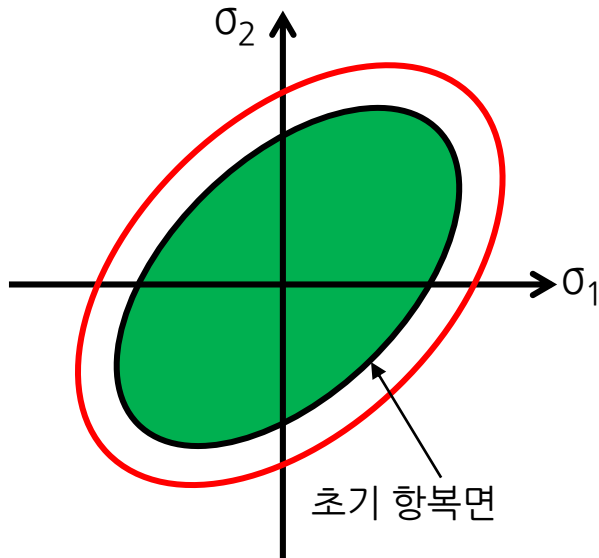


- 항복 응력이 일정한 영역을 유지
- 항복 응력의 중심이 소성변형을 따라 이동

3차원 응력 경화모델

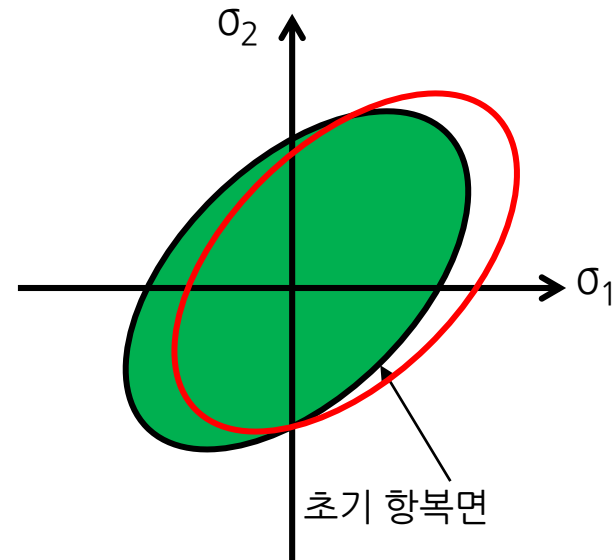
3차원 응력 상태의 경화 모델 → 항복 영역이 면으로 표현

✓ 등방성(Isotropic) 경화모델



➤ 항복면의 반경이 증가

✓ 이동성(Kinematic) 경화모델

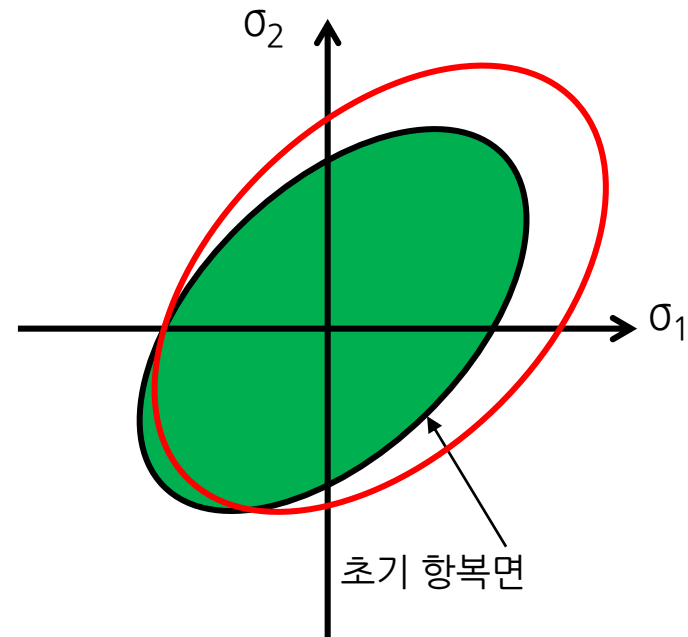
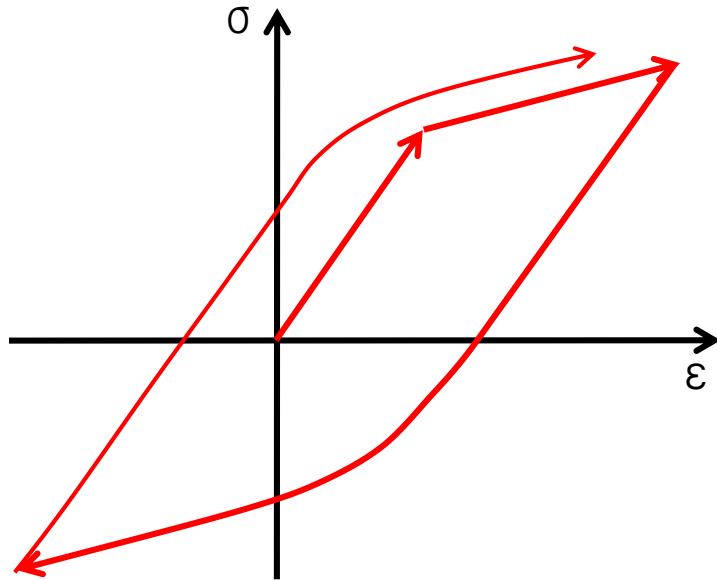


➤ 항복면의 중심이 이동
(면적은 유지됨)

바우싱어 효과

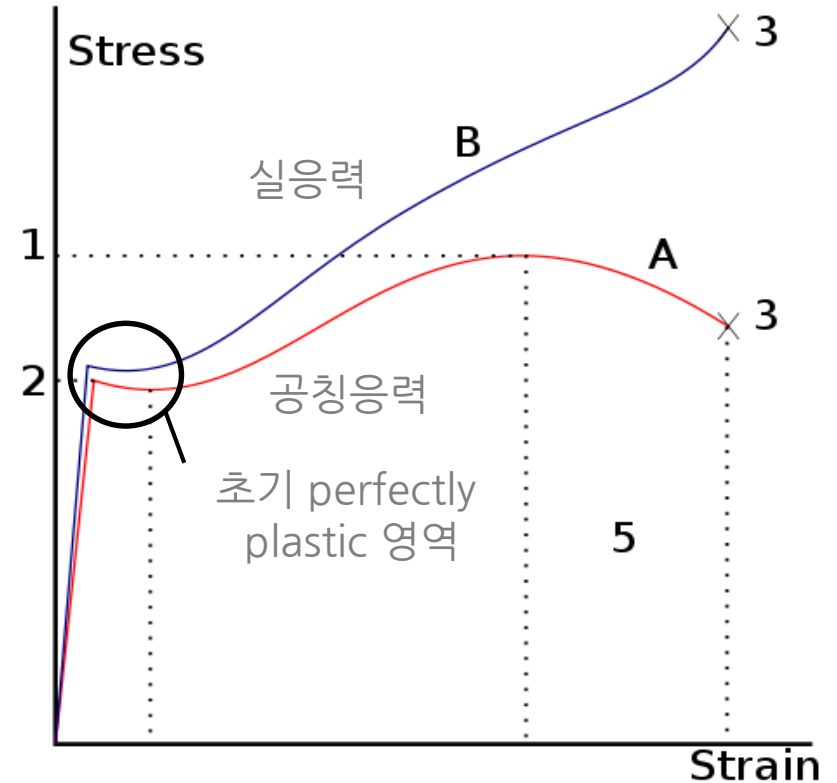
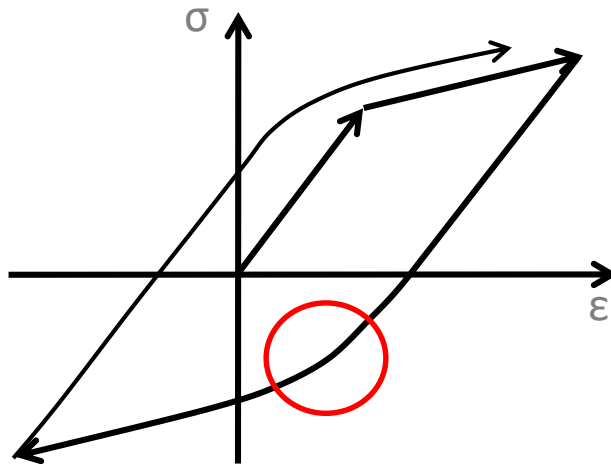
- 반복적으로 하중이 가해지는 경우, 인장한 다음에 압축시의 항복 강도가 인장 시의 항복강도에 비해 감소하는 현상

즉, 등방성 경화모델과 이동성 경화 모델 모두 부정확하므로 두 경화모델을 조합 → 중심이 이동하면서 반경이 커짐



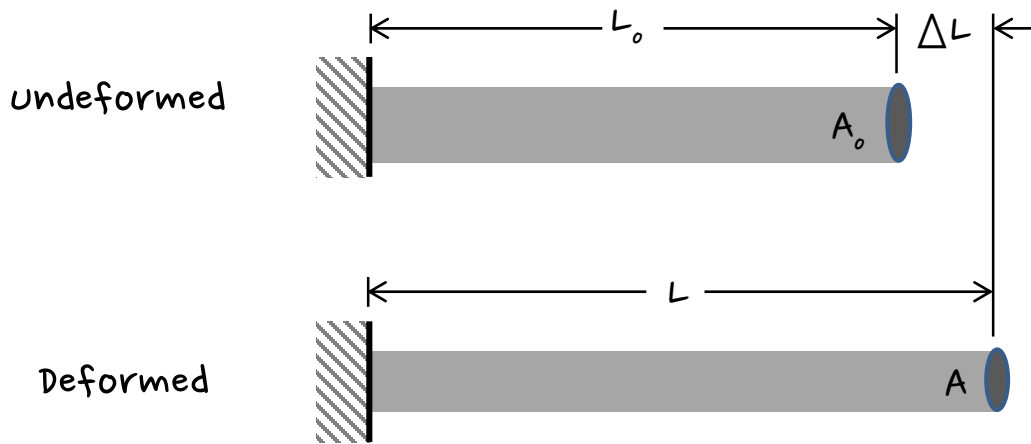
Kinematic Hardening과 Bauschinger Effect

- 실 응력과 공칭 응력 (측정값)의 차이
- 공칭 응력에 나타나는 변형 연화 부분이 실 응력에서는 나타나지 않음
- 초기 perfectly plastic 영역 (steel)
- Non-positive definite material
- 바우싱거 효과



공칭응력 VS 진응력

- 재료의 인장실험을 통해 얻은 응력-변형률 곡선은 면적의 변화를 고려하지 않는다. (즉, 공칭응력-공칭변형률 곡선)
- 면적의 변화를 고려한 진응력-진변형률 곡선으로 변환하여 입력하는 것이 좋다.



$$\sigma = \frac{F}{A_0}, \quad \epsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$$



$$\sigma = \frac{F}{A}, \quad \epsilon = \frac{\Delta L}{L}$$

진응력(trus stress), 진변형률 (True Strain) 변환식 ※ 1차원에만 적용 가능

$$\sigma_{True} = \frac{F}{A} = \sigma_{Eng}(1 + \epsilon_{Eng}), \quad \epsilon_{True} = \int_{L_0}^L \frac{\Delta L}{L} = \ln \frac{L}{L_0} = \ln(1 + \epsilon_{Eng})$$

공칭응력 VS 진응력

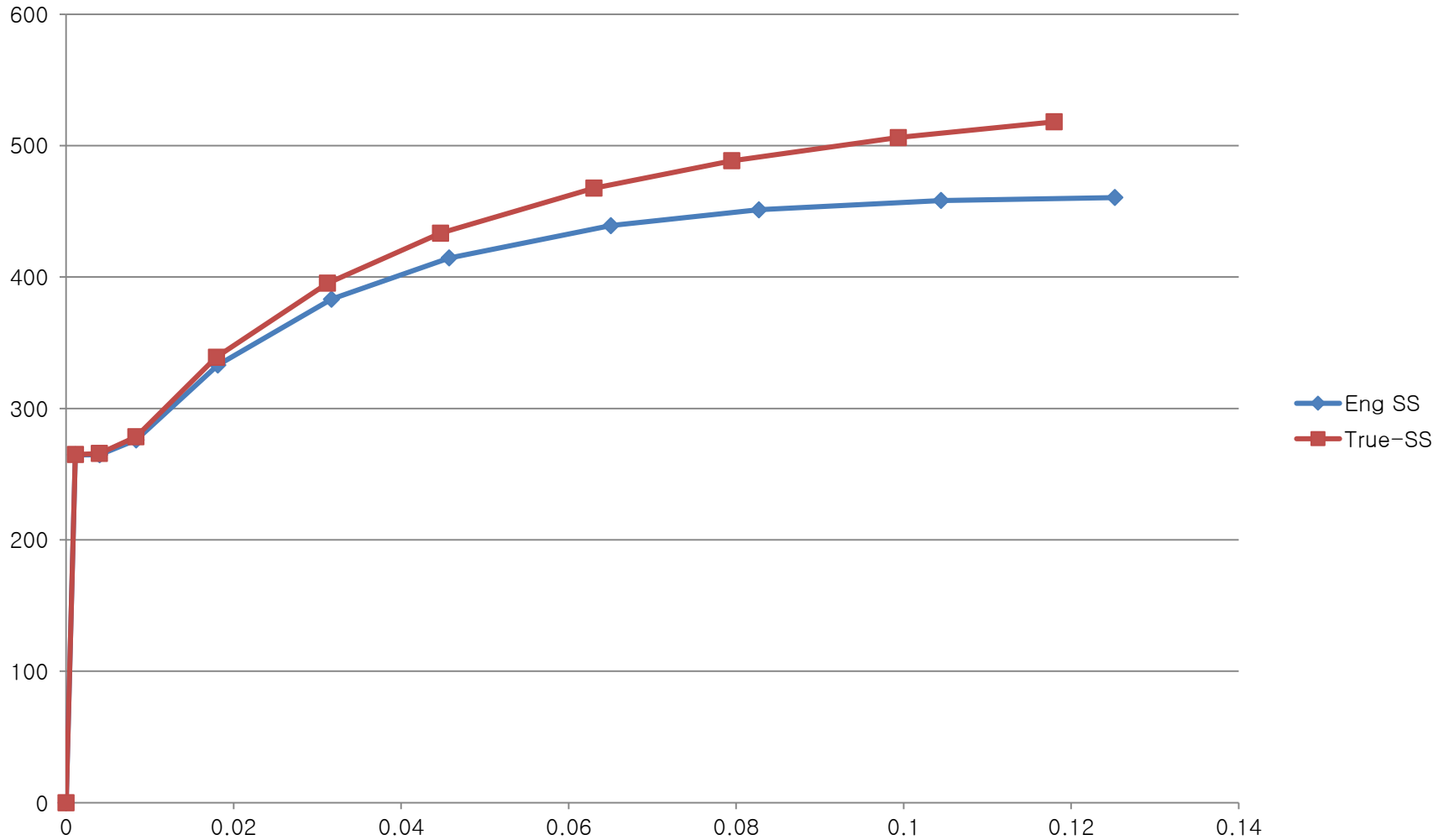
$$Plastic\ Strain = Total\ Strain - \left(\frac{Yield\ Stress}{Young's\ Modulus} \right)$$

$$\epsilon_{True} = \ln(1 + \epsilon_{eng})$$

공칭변형률 Eng. Strain (mm/mm)	공칭응력 Eng. Stress (MPa)	진변형률 True Strain (mm/mm)	진응력 True Stress (MPa)	Plastic Strain (mm/mm)	True Stress (MPa)
0.00000	0.00	0.00000	0.00		
0.00112	264.70	0.00112	265.00	0.00000	265.00
0.00400	264.70	0.00399	265.76	0.00287	265.76
0.00837	276.14	0.00834	278.45	0.00722	278.45
0.01811	332.96	0.01795	338.99	0.01683	338.99
0.03170	383.16	0.03121	395.31	0.03009	395.31
0.04574	414.51	0.04472	433.47	0.04361	433.47
0.06505	439.14	0.06302	467.71	0.06190	467.71
0.08273	451.17	0.07949	488.50	0.07837	488.50
0.10447	458.31	0.09937	506.19	0.09825	506.19
0.12521	460.50	0.11797	518.16	0.11685	518.16

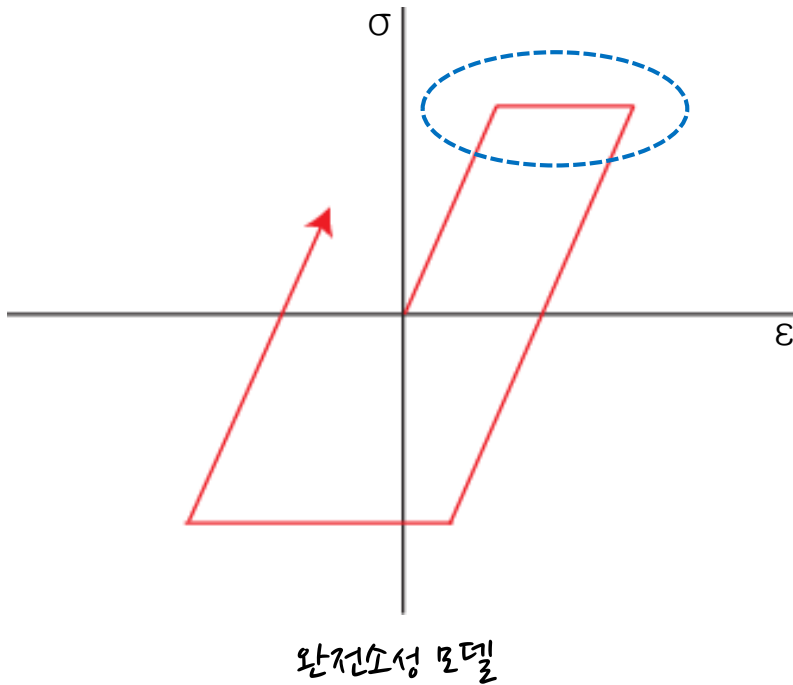
$$\sigma_{True} = \sigma_{eng} (1 + \epsilon_{eng})$$

공칭응력 VS 진응력



완전소성(Perfect Plastic) 모델

- 소성 구간의 곡선의 기울기가 0인 모델
- 항복응력을 입력하여 소성 시작점을 정의한다.



재료비선택 색상

선택 탭: 탄소성 | 초탄성 | 비탄성 | 온도 의존

구조

탄성계수	0 N/mm ²	열응력	
프와송비	0	열팽창계수	0
질량밀도	0 kg/mm ³	기준온도	0 [T]

항복기준 Von Mises

소성경화 곡선

응력-변형률 곡선

경화규칙 등방성

복합경화 계수 (0.0-1.0) 0

완전 소성 재료

항복응력 입력

크리프 ...

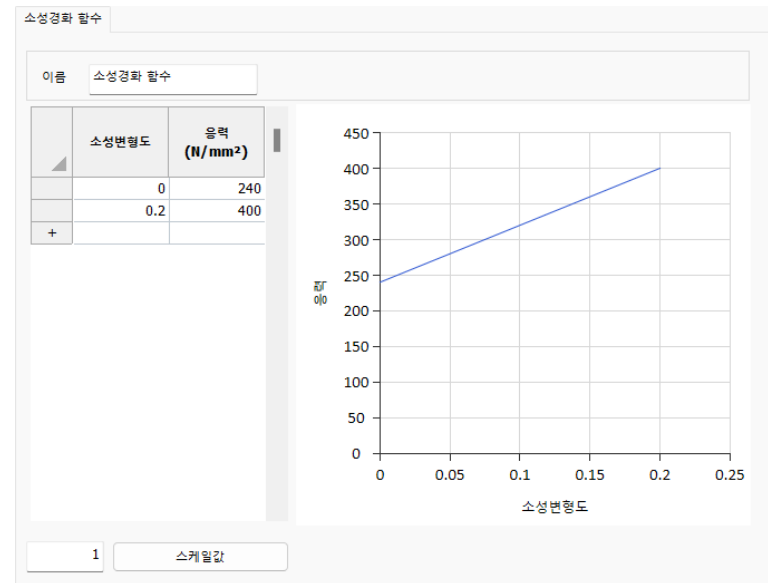
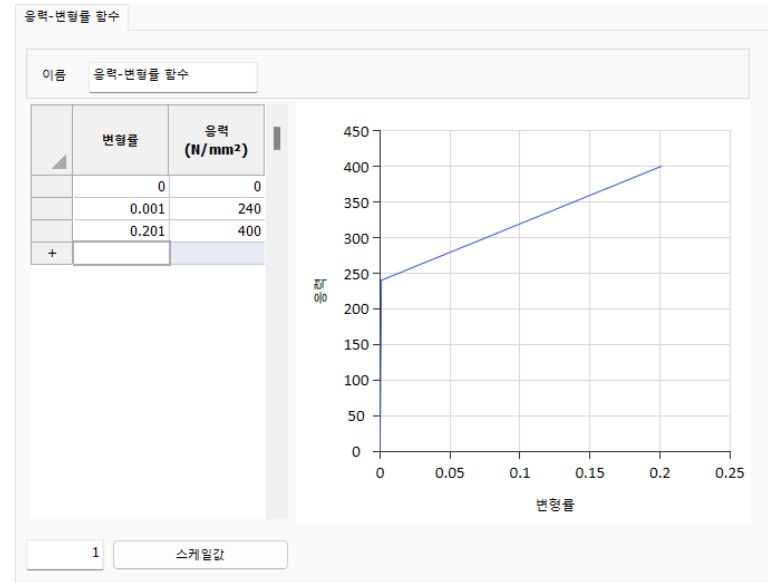
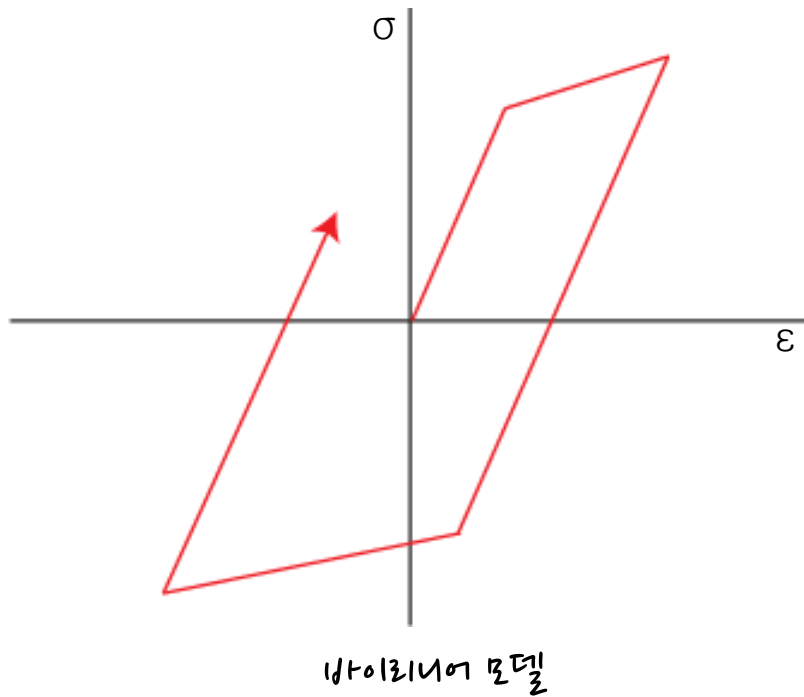
외연적 비선형동해석 요소제거 기준

전단 파괴

파괴시 유효소성 변형률 ...

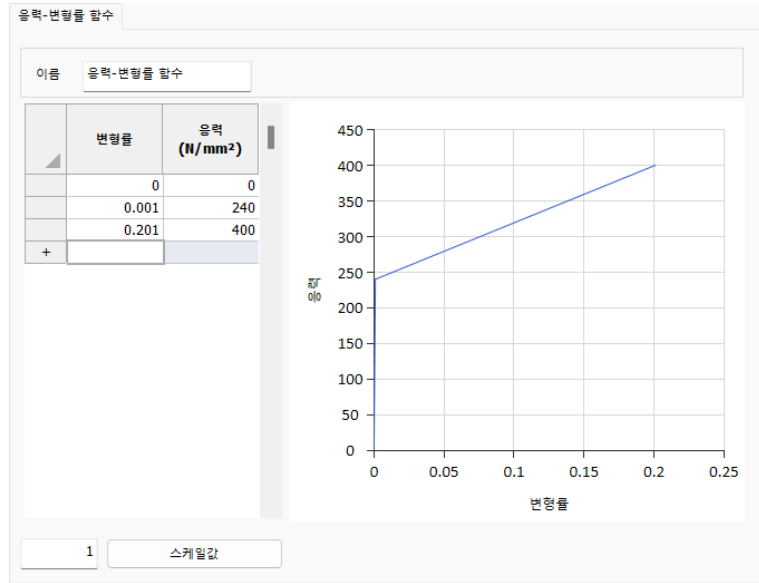
바이리니어(Bi-Linear) 모델

- 경화구간 곡선이 하나의 직선으로 구성
- 소성경화 곡선, 응력-변형률 곡선을 이용하여 정의



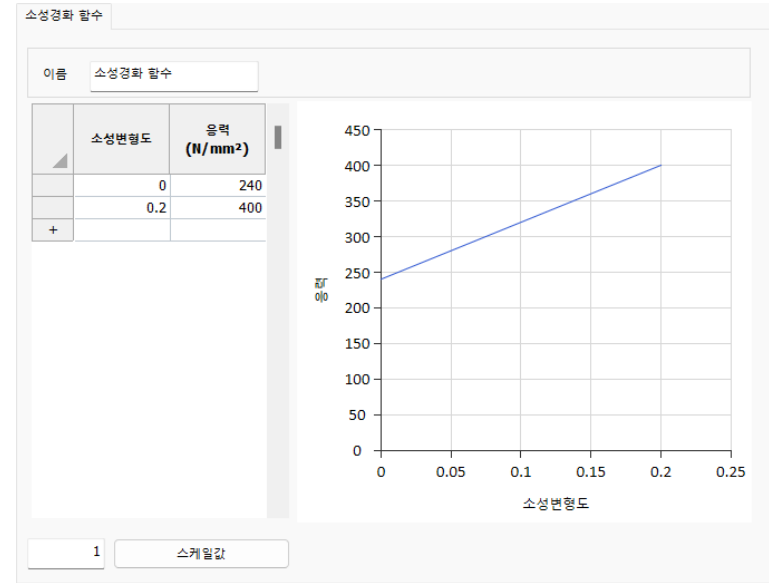
응력-변형률 함수, 소성경화 함수

응력-변형률 함수



- 첫 번째 시작행에서는 변형률과 응력에 0값이 입력
- 두 번째 행에 탄성 변형률과 항복응력 입력
- 세 번째 행부터는 소성 변형률과 응력입력

소성경화 함수 (응력-변형률함수의 소성구간만을 정의)

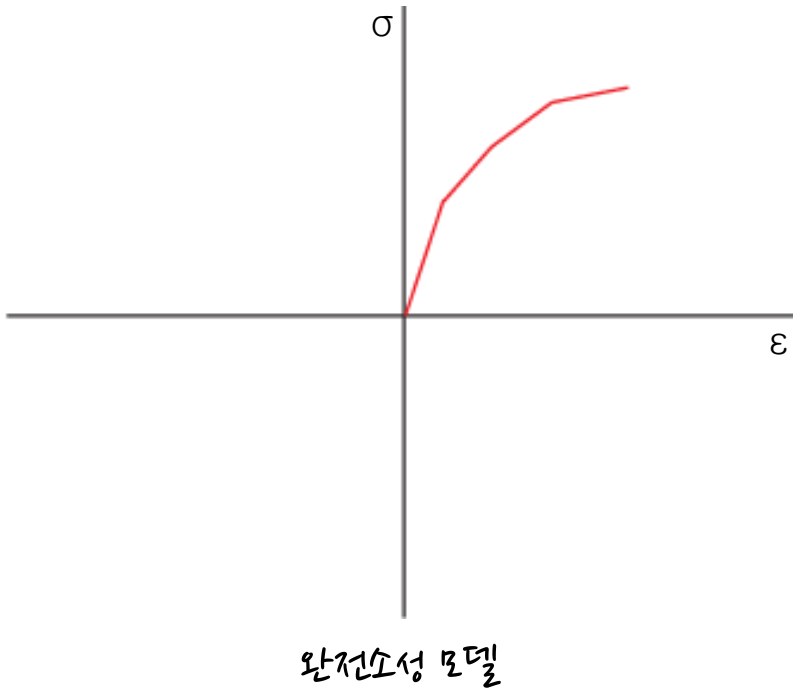


- 첫 번째 시작행에서는 변형률에는 0값이 입력, 응력값에는 항복강도 입력
- 두 번째 행부터는 소성 변형률과 응력입력

※ 항복점이 그래프의 시작점이므로 변형률 값을 정확히 계산해야한다.

멀티리니어(Multi-Linear) 모델

- 경화구간 곡선이 여러 개의 직선으로 구성
- 실제 재료실험을 통해 얻어진 데이터로 정의



함수 생성/변경

응력-변형률 함수

이름: 응력-변형률 함수

변형률	응력 (N/mm ²)
0	0
0.001	265
0.0039	265.8
0.0082	278.4
0.0178	339
0.0311	395.3
0.0446	433.5
0.0629	467.7
0.0794	488.5
0.099	506.2
0.1169	518.2

	A	B
1	변형률	응력
2	0	0
3	0.001	265
4	0.0039	265.76
5	0.0082	278.45
6	0.0178	338.99
7	0.0311	395.31
8	0.0446	433.47
9	0.0629	467.71
10	0.0794	488.5
11	0.099	506.19
12	0.1169	518.16

1 스케일값

확인

Excel에서 복사 및 붙여넣기

개요

➤ 비선형정적해석

- 단위 : N, mm
- 기하모델: Tensile Test.x_t

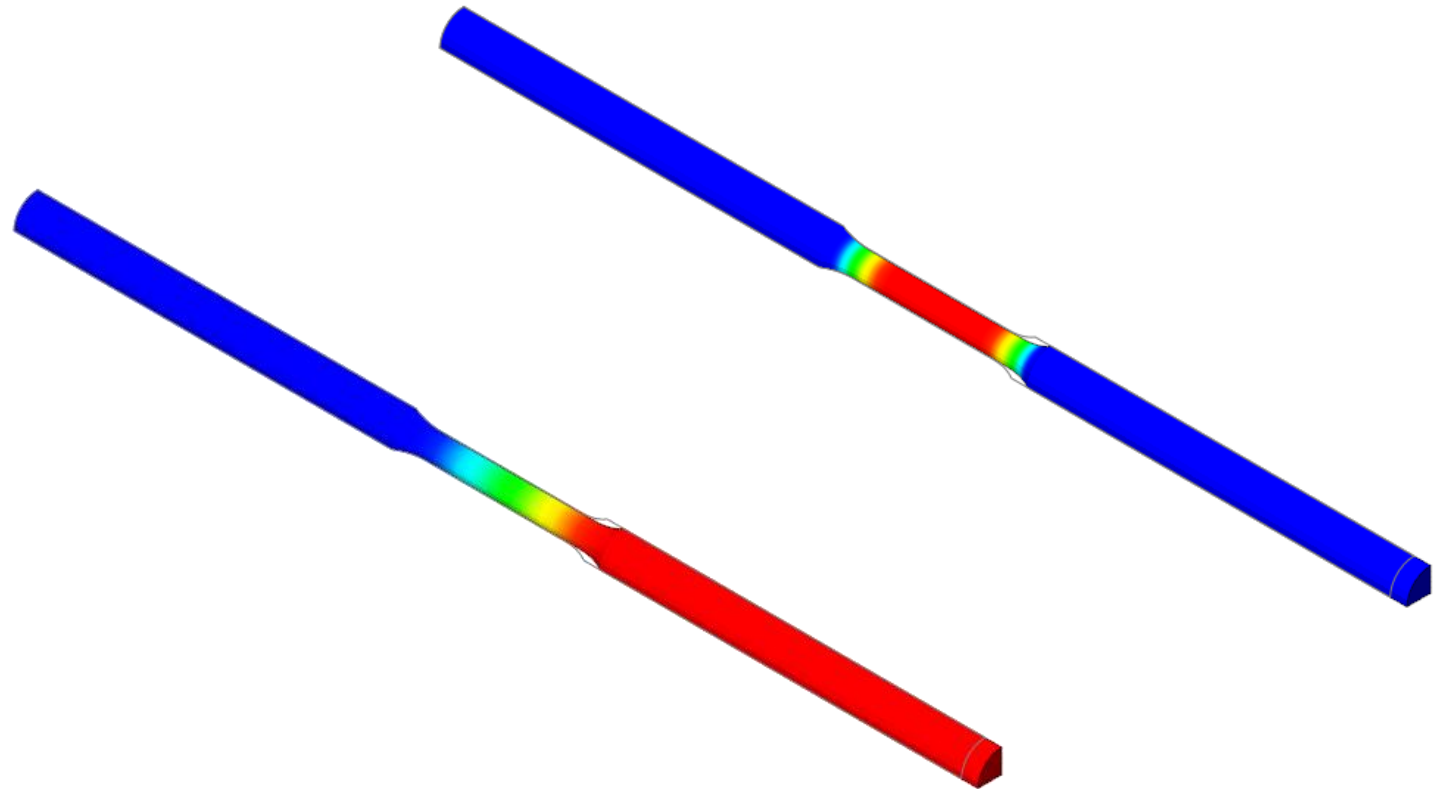
➤ 경계조건과 하중조건

- 경계조건 (고정구속)
- ¼ 대칭조건
- 강제변위

➤ 결과확인

- 대칭모델 보기
- 변위
- 애니메이션

Tensile Test



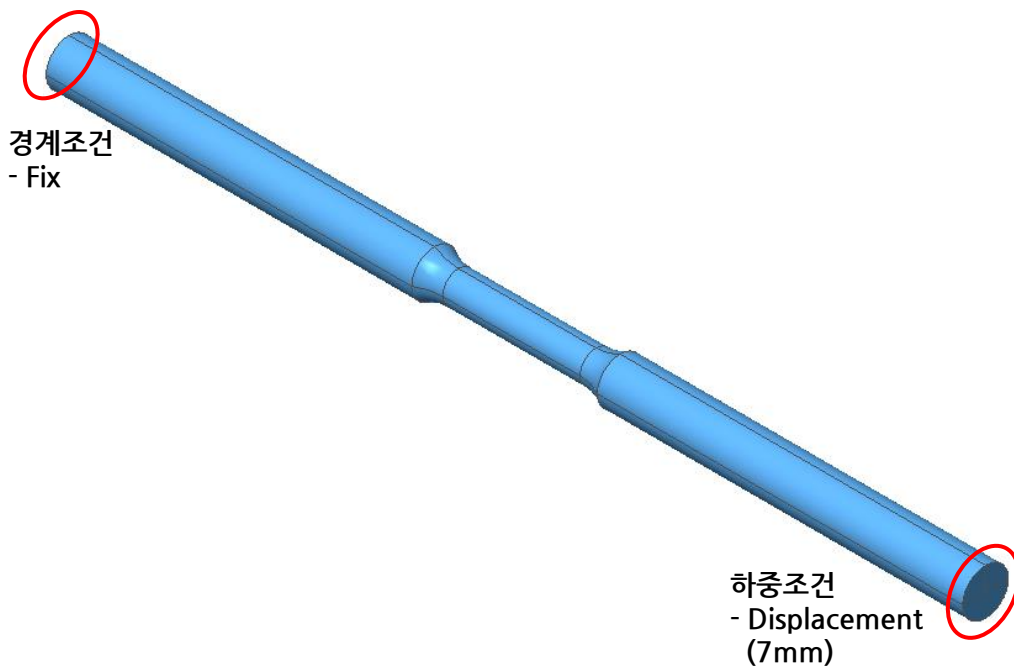
따라하기 목적

➤ 재료 비선형 예제

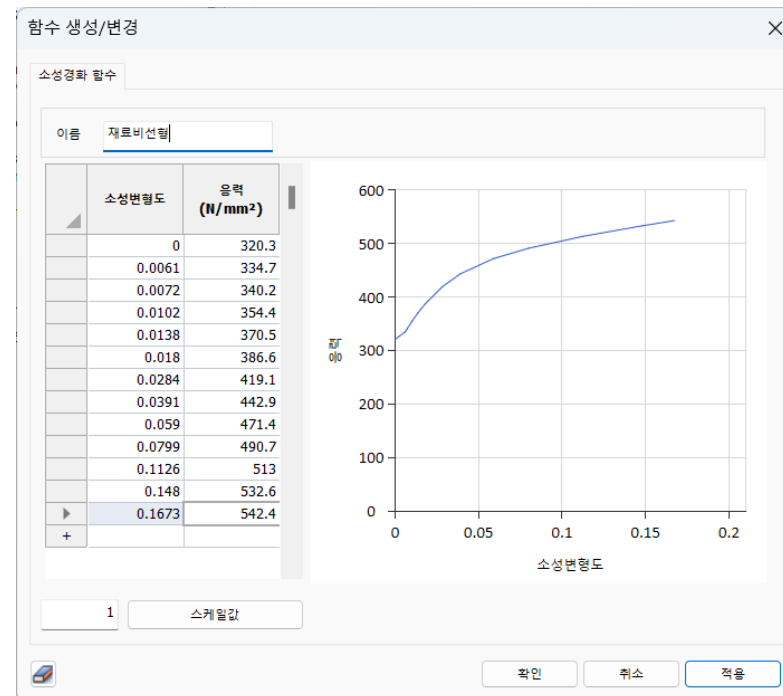
- 재료 비선형 해석을 위해 응력-변형률 그래프 입력 방법을 습득합니다.
- ¼ 모델을 이용한 해석 방법을 습득합니다.(대칭조건 설정)
- ¼ 모델에서 전체 모델로 확장하여 결과를 보는 방법을 습득합니다.

해석 개요



➤ 해석 조건 - 경계/하중 조건

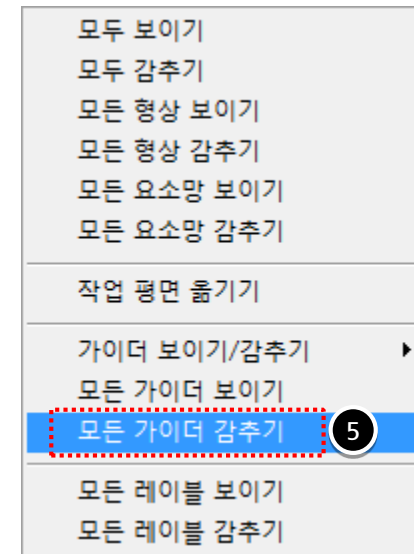
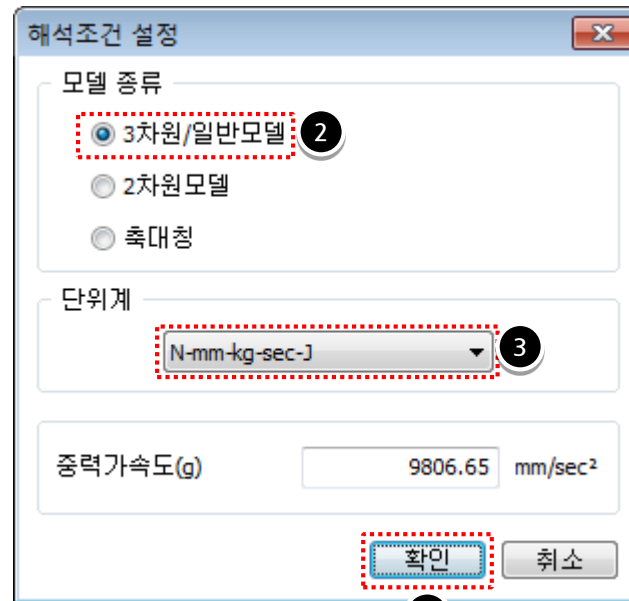



➤ 재료 비선형 그래프 입력 (응력-변형률 곡선)




작업순서

1. [] (새로 만들기) 클릭. 
2. [3차원/일반모델] 선택.
3. 단위계 [N-mm-kg-sec-J] 선택.
4. [확인] 버튼 클릭.
5. 작업윈도우에서 마우스 오른쪽 버튼 클릭 후, [모든 가이드 감추기] 선택.

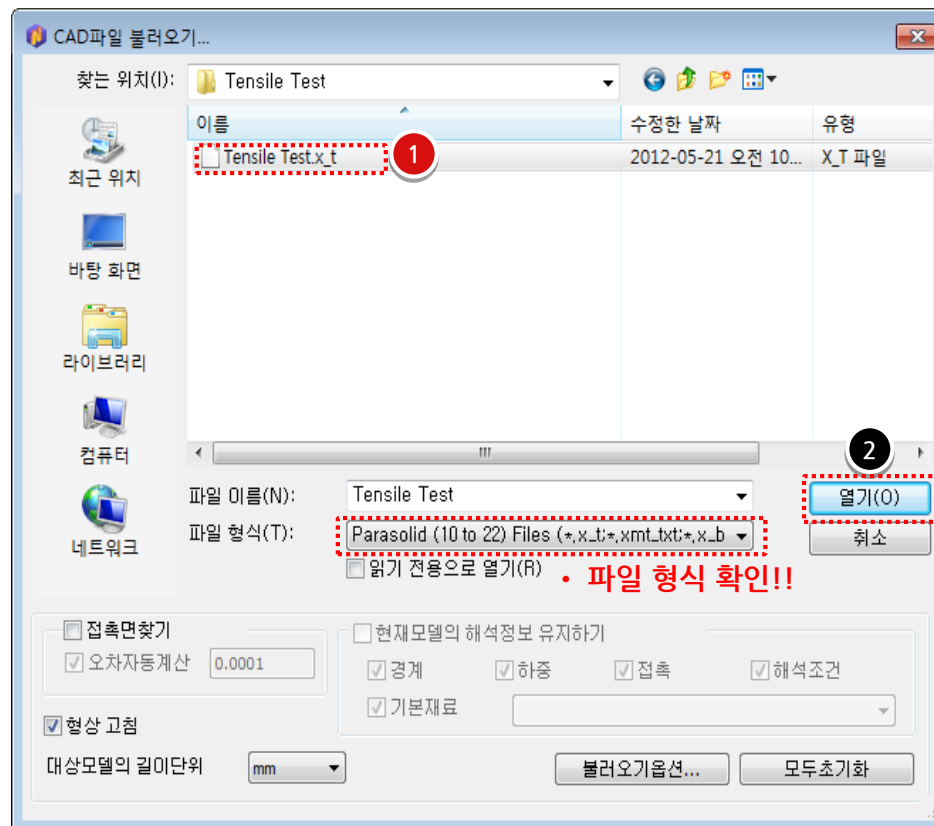


 프로그램을 실행시킨 후 [새로 만들기] 를 클릭하면 모든 메뉴가 활성화 됩니다.

 해석조건설정 대화상자는 시작과 함께 자동으로 보여집니다.

작업순서

1. 모델 선택: Tensile Test.x_t 선택
2. [열기] 버튼 클릭.



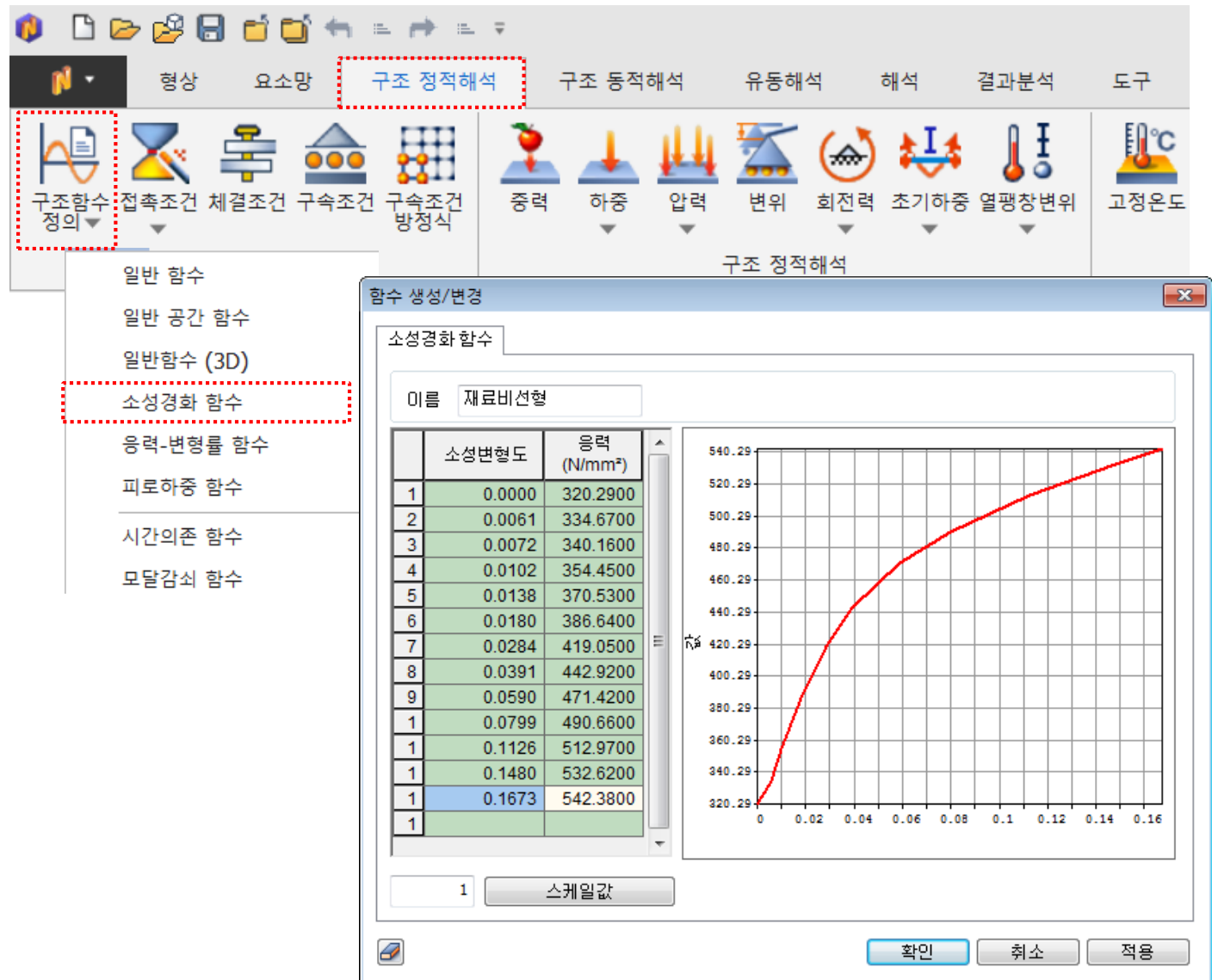
작업순서

1. 이름 : 재료비선형 입력.

2. 소성경화 함수 입력

소성변형도	응력(N/mm ²)
0	320.29
0.0061	334.67
0.0072	340.16
0.0102	354.45
0.0138	370.53
0.0180	386.64
0.0284	419.05
0.0391	442.92
0.0590	471.42
0.0799	490.66
0.1126	512.97
0.1480	532.62
0.1673	542.38

3. [확인] 버튼 클릭.



The screenshot shows the software interface for defining a strain-hardening function. The '구조 정적해석' (Structural Static Analysis) menu is selected, and the '구조 정적해석' (Structural Static Analysis) option is highlighted. The '함수 생성/변경' (Function Creation/Modification) dialog box is open, showing the '소성경화 함수' (Strain Hardening Function) tab. The name is set to '재료비선형' (Material Non-linear). The table below shows the data points for the function, and the graph on the right displays the resulting curve.

번호	소성변형도	응력 (N/mm ²)
1	0.0000	320.2900
2	0.0061	334.6700
3	0.0072	340.1600
4	0.0102	354.4500
5	0.0138	370.5300
6	0.0180	386.6400
7	0.0284	419.0500
8	0.0391	442.9200
9	0.0590	471.4200
1	0.0799	490.6600
1	0.1126	512.9700
1	0.1480	532.6200
1	0.1673	542.3800
1		


The graph shows the relationship between strain (소성변형도) on the x-axis and stress (응력) on the y-axis. The x-axis ranges from 0 to 0.16, and the y-axis ranges from 320.29 to 542.38. The curve starts at (0, 320.29) and increases non-linearly, reaching (0.1673, 542.38).

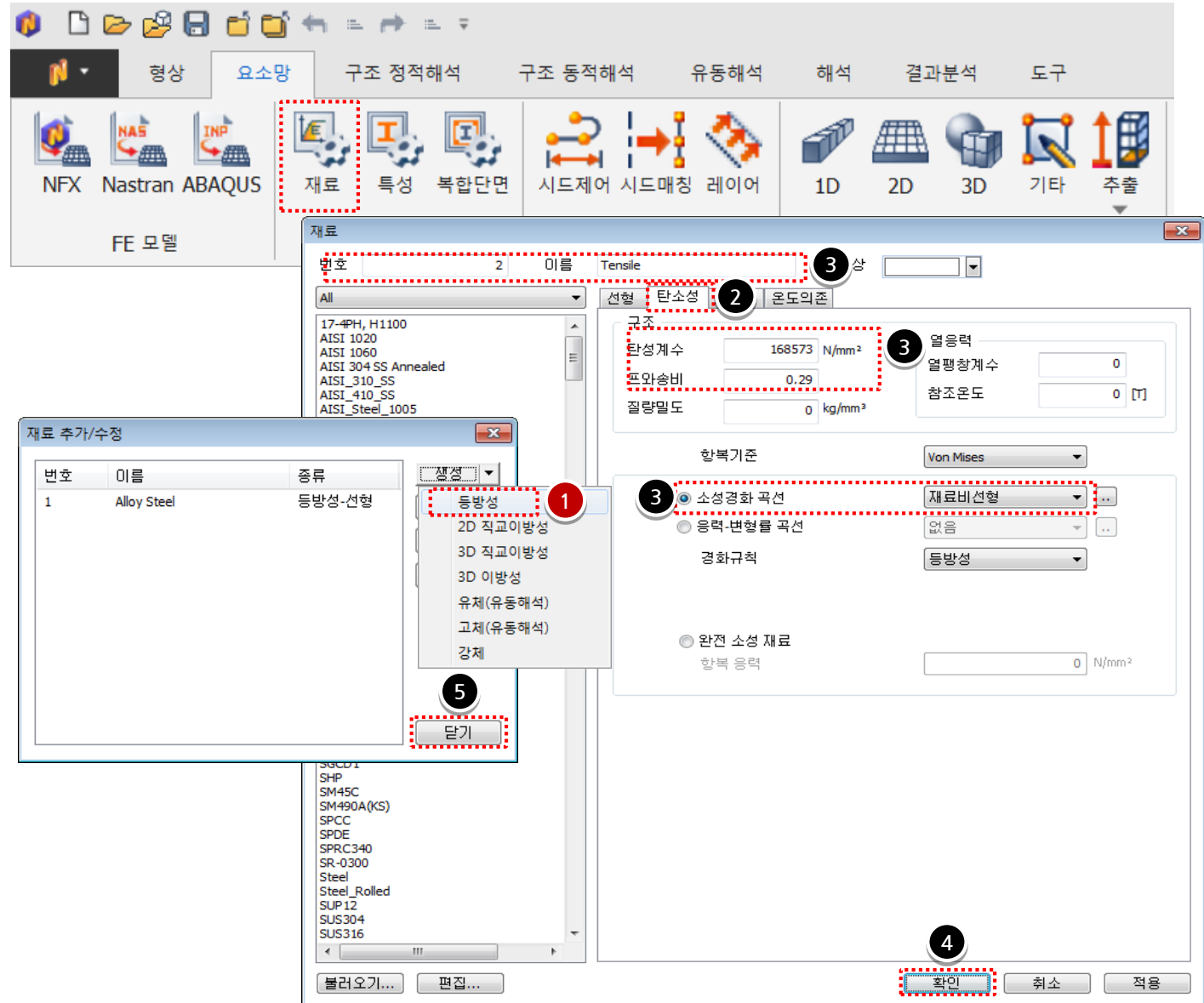
작업순서

1. 생성 >> 등방성 클릭
2. [탄소성] 탭 클릭
3. 재질입력

번호	2
이름	Tensile
탄성계수	168573 (N/mm ²)
프와송비	0.29
소성경화 곡선	재료비선형

4. [확인] 버튼 클릭.
5. [닫기] 버튼 클릭

 기본적인 선형 탄성 물성치는 반드시 입력해 주어야 합니다.



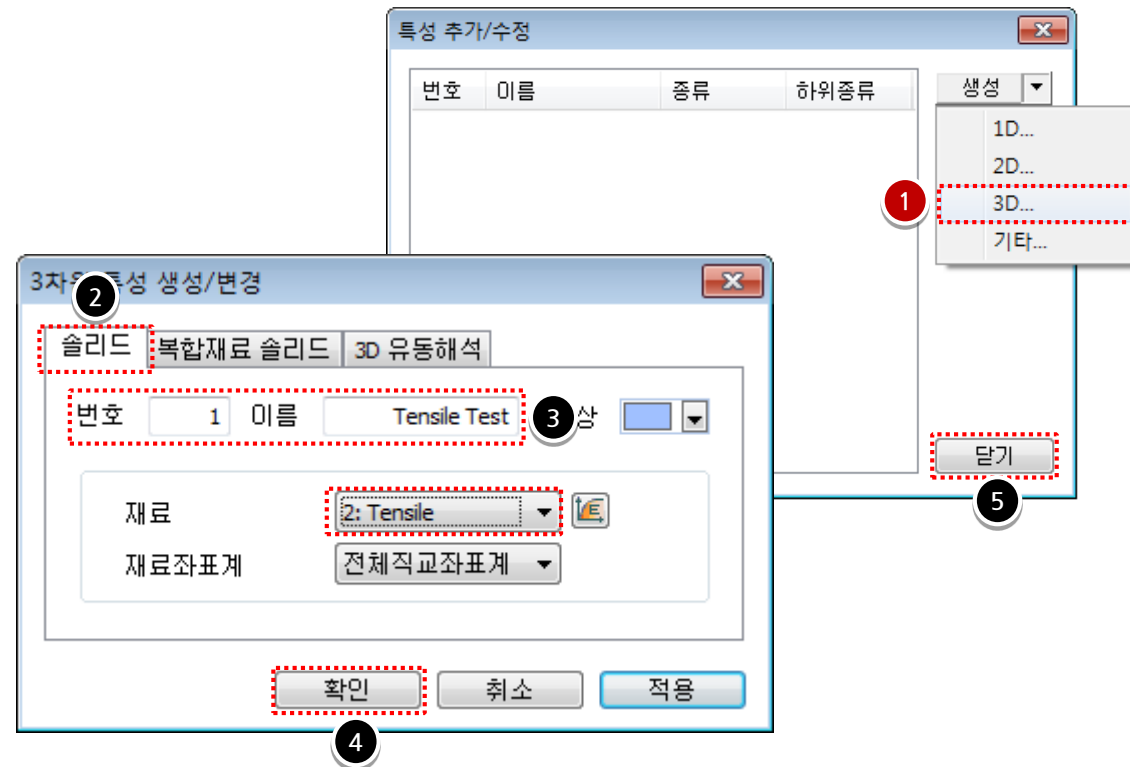
The screenshot shows the '재료' (Material) dialog box in the Midas NFX software. The '번호' (Number) is 2 and the '이름' (Name) is 'Tensile'. The '선형' (Linear) tab is selected, and the '탄소성' (Elasticity) sub-tab is active. The '구조' (Structure) section shows the input of Young's Modulus (탄성계수) as 168573 N/mm² and Poisson's Ratio (프와송비) as 0.29. The '소성경화 곡선' (Strain Hardening Curve) section shows the selection of '재료비선형' (Material Non-linear). The '확인' (OK) button is highlighted with a red dashed box and a circled '4'. Other buttons like '닫기' (Close) and '적용' (Apply) are also visible.

작업순서

1. 생성 >> 3D 클릭
2. [솔리드] 탭 선택.
3. 특성 입력

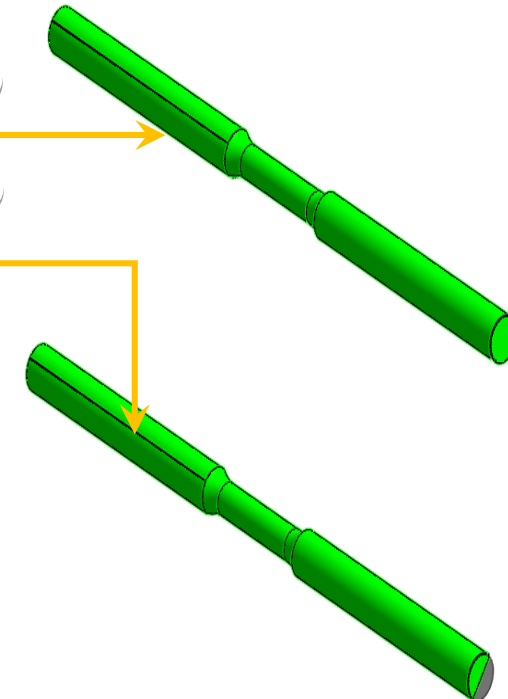
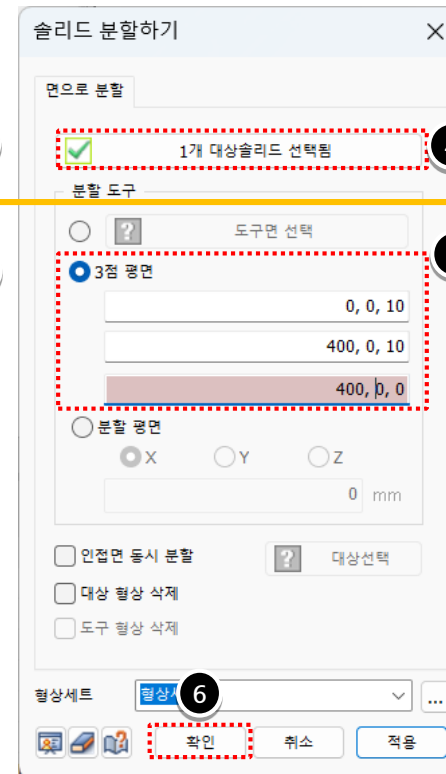
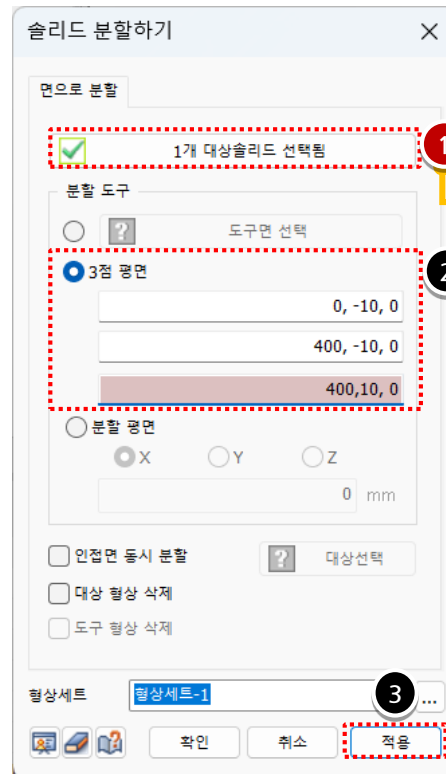
번호	1
이름	Tensile Test
재질	2: Tensile

4. [확인] 버튼 클릭.
5. [닫기] 버튼 클릭.




작업순서

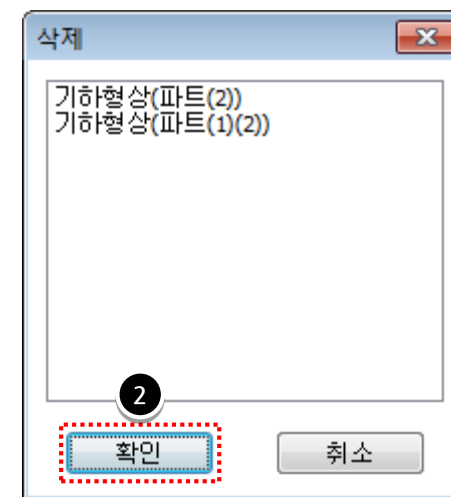
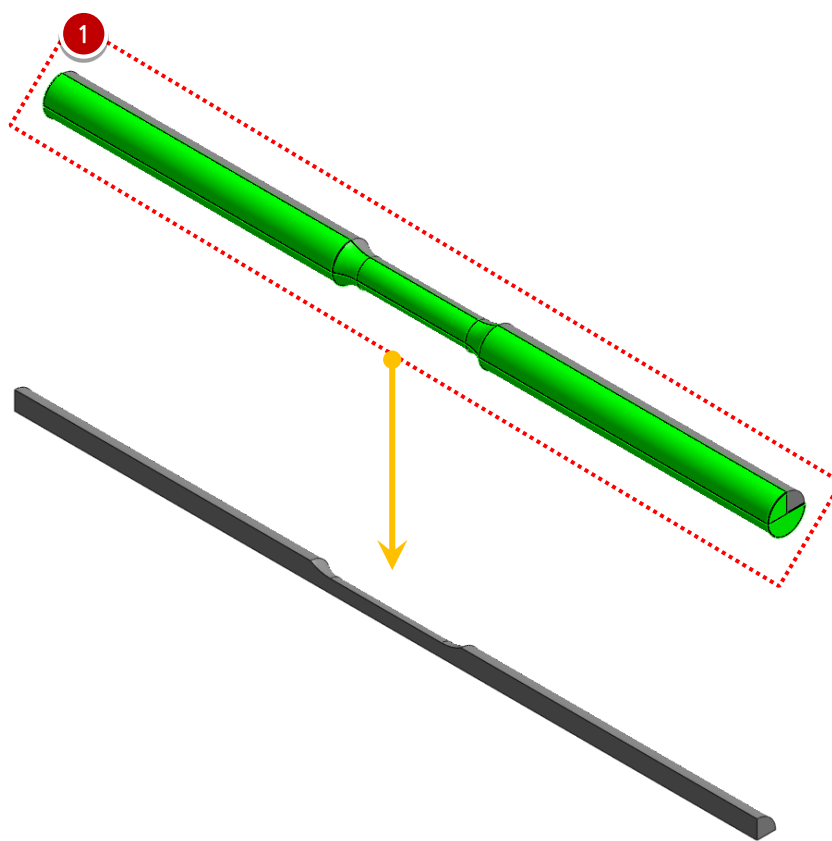
1. 대상 선택: 모델(1개) 선택. (그림참조)
2. 분할 툴 : "3점 평면" 선택.
(0, -10, 0), (400, -10, 0), (400, 10, 0)
입력.
3. [적용] 버튼 클릭.
4. 대상 선택: 모델(1개) 선택. (그림참조)
5. 분할 툴 : "3점 평면" 선택.
(0, 0, 10), (400, 0, 10), (400, 0, 0)
입력.
6. [확인] 버튼 클릭.



작업순서

1. [] (등각보기1) 클릭.
2. 대상 선택: 모델(2개) 선택. (그림참조)
3. 키보드에 Delete 버튼 누르고

[확인] 버튼 클릭



작업순서

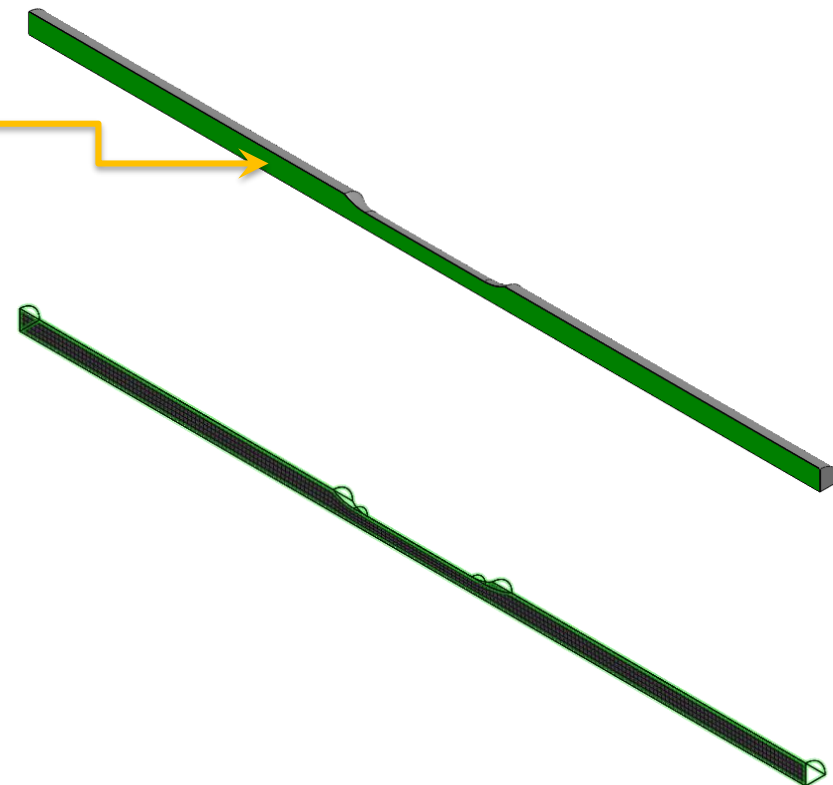
1. [사상-면] 탭 선택

2. 요소망 생성 입력

대상선택	면 1개 선택
요소크기	2
특성번호	2


3. [확인] 버튼 클릭.

요소망 생성시 특성번호를 입력해야 합니다. 여기서 생성된 사상요소망(면)은 직선추출요소망 생성 시에만 필요한 소스 요소망입니다. 추출 후에는 삭제되므로 특성번호를 임의로 지정합니다.

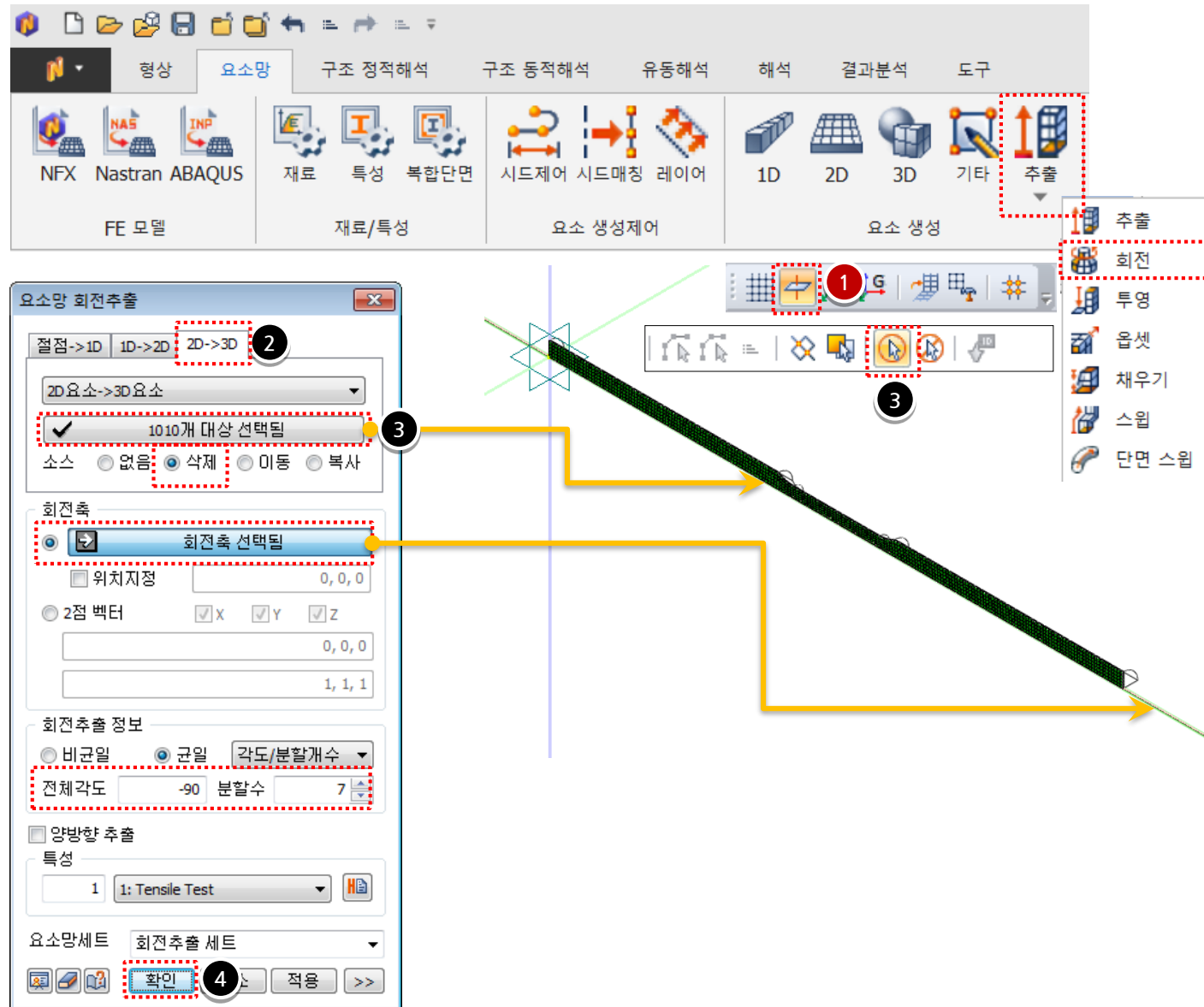


작업순서

1. [데이텀 보이기/감추기] 클릭
2. [2D->3D] 탭 선택
3. 요소망 회전 추출 입력

대상선택	전체 선택 
소스	삭제
회전축	X축 선택
전체각도	-90
분할수	7

4. [확인] 버튼 클릭.



요소망 회전추출

절점->1D 1D->2D 2D->3D ②

2D요소->3D요소

1010개 대상 선택됨 ③

소스 없음 삭제 이동 복사

회전축

회전축 선택됨

위치지정 0, 0, 0

2점 벡터 X Y Z

0, 0, 0

1, 1, 1

회전추출 정보

비균일 균일

전체각도 -90 분할수 7



양방향 추출

특성

1 1: Tensile Test

요소망세트 회전추출 세트

확인 ④ 취소 적용 >>

 [] (전체 선택) 을 클릭하면 화면상에 보이는 모델이 전부 선택됩니다.

작업순서

1. [] (우측면 보기) 클릭.

2. [고급] 탭 클릭

3. 대칭조건 입력(1)

이름	대칭조건1
대상종류	절점
대상선택	1218개 선택 (그림참조)
대칭평면	ZX

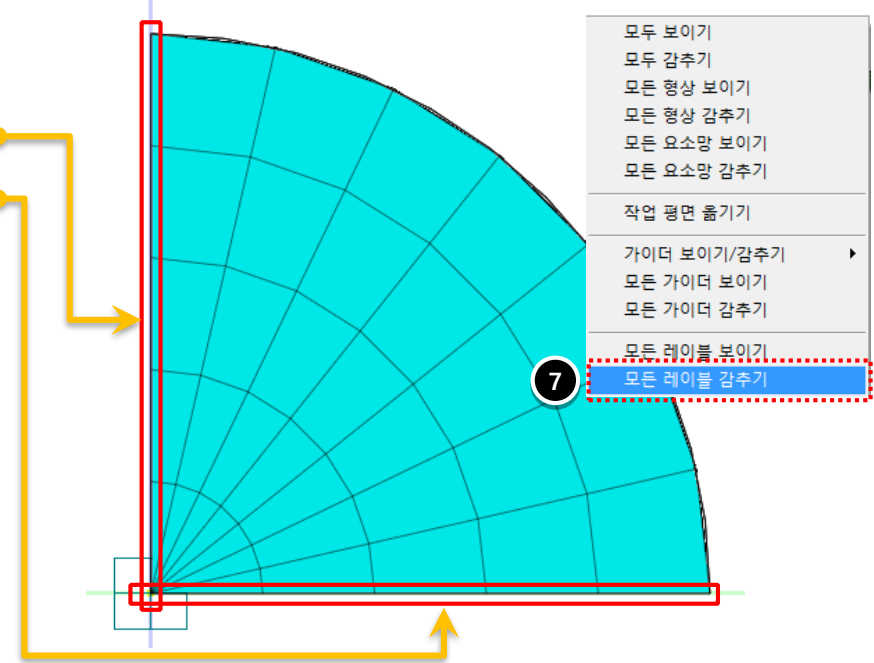
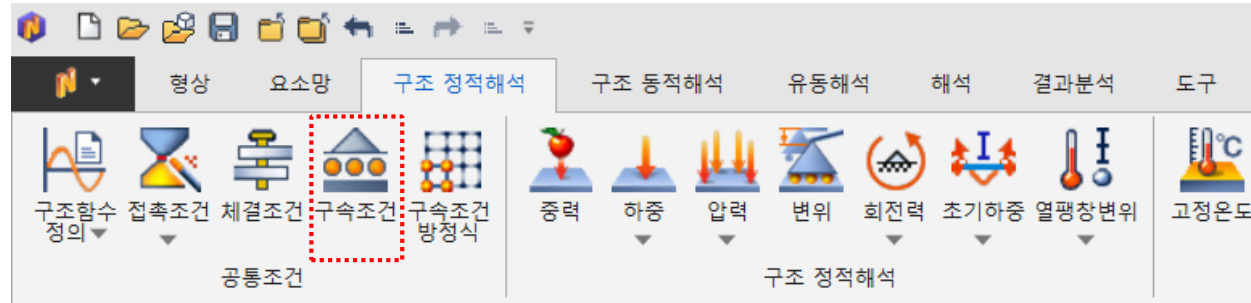
4. [적용] 버튼 클릭.

5. 대칭조건 입력(2)

이름	대칭조건2
대상종류	절점
대상선택	1218개 선택 (그림참조)
대칭평면	XY

6. [확인] 버튼 클릭.

7. 작업윈도우에서 마우스 오른쪽 버튼
클릭 후, [모든 레이블 감추기] 선택.



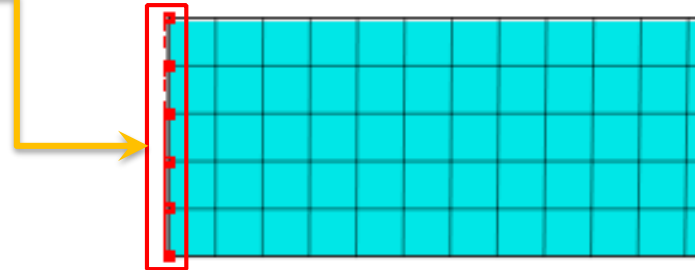
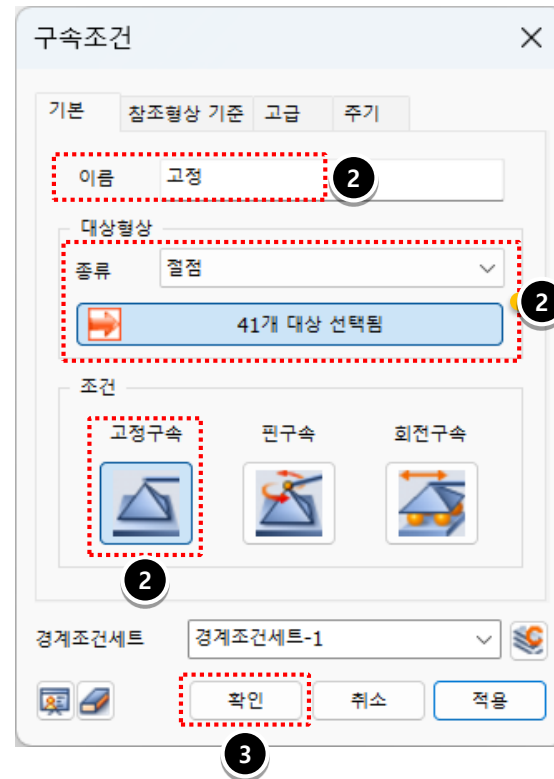
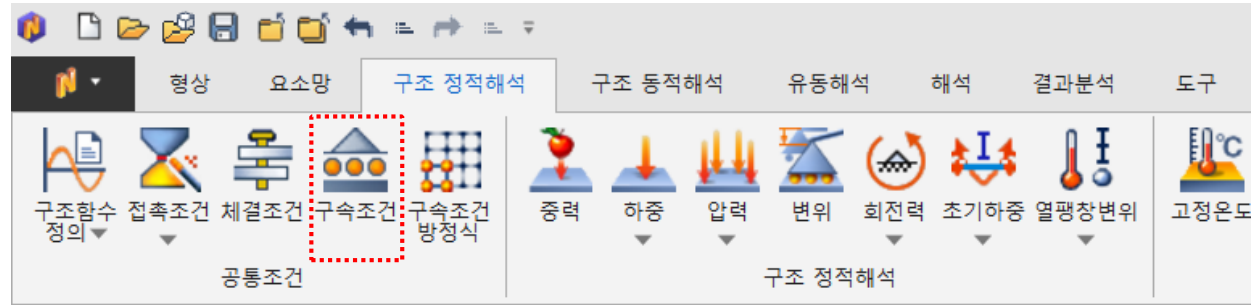
작업순서

1. [] (정면보기) 클릭.

2. 구속조건 입력

이름	고정
대상종류	절점
대상선택	41개 선택 (그림참조)
조건	고정구속

3. [확인] 버튼 클릭.

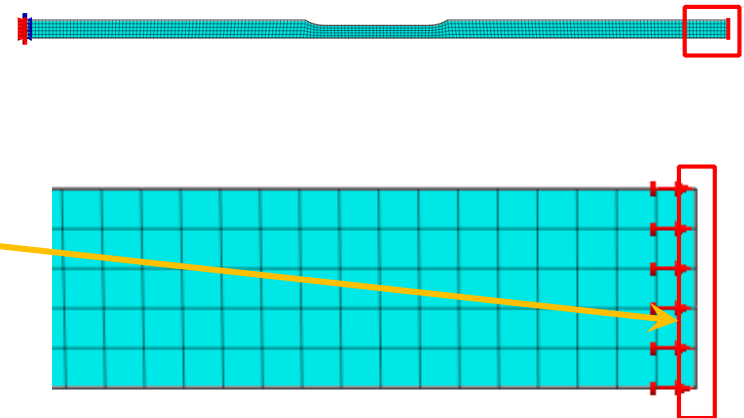
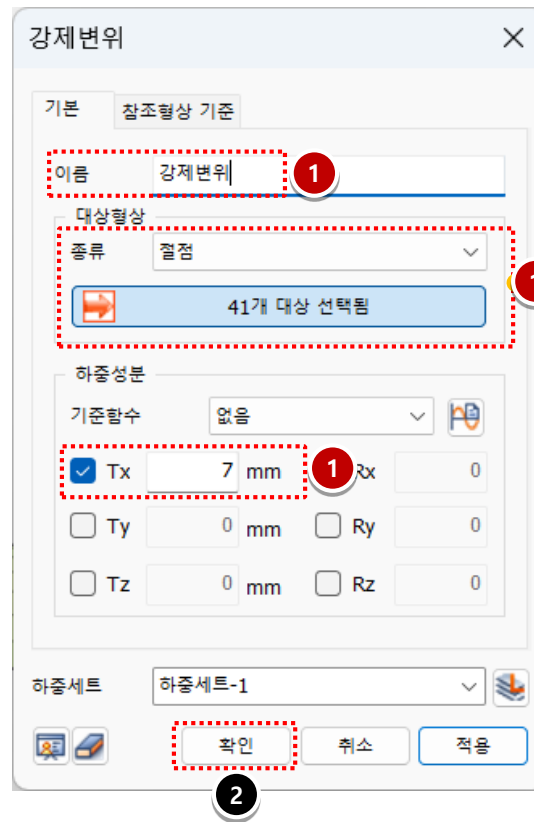
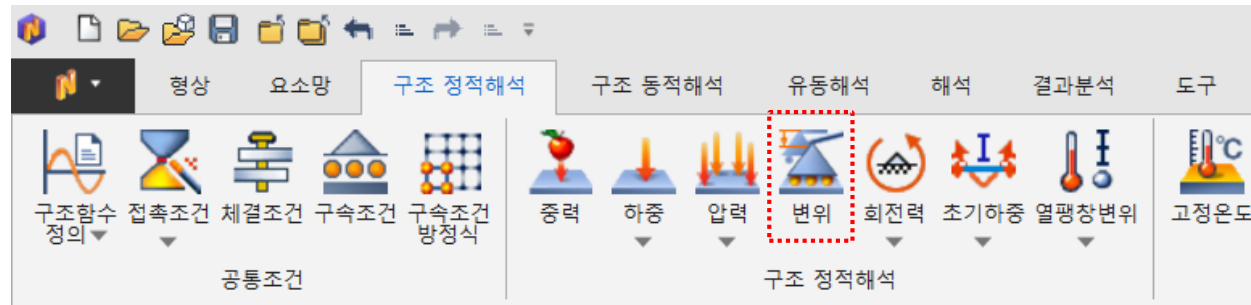


작업순서

1. 강제변위 입력

이름	강제변위
대상종류	절점
대상선택	41개 선택 (그림참조)
변위(Tx)	7 (mm)



2. [확인] 버튼 클릭.



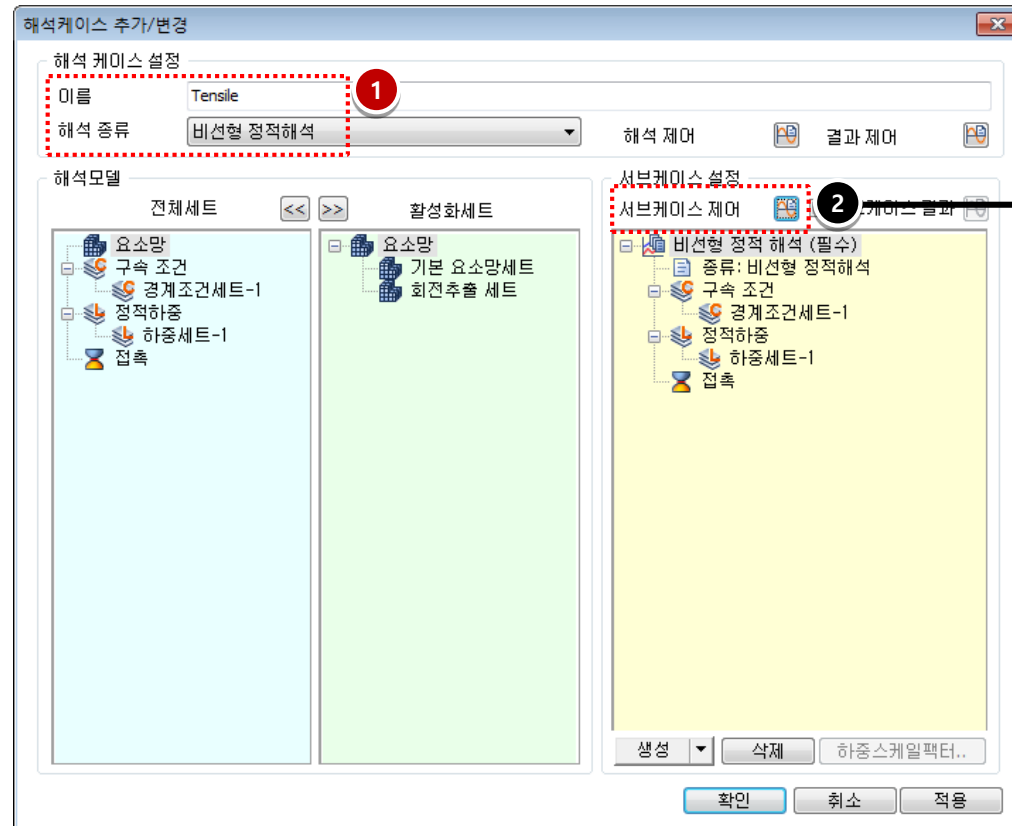
작업순서

1. 이름: "Tensile" 입력.


해석 종류: [비선형 정적해석] 선택.

2. [] (서브케이스 제어) 클릭. 

("비선형 정적해석(필수)" 서브케이스를 클릭해야 활성화됩니다.)

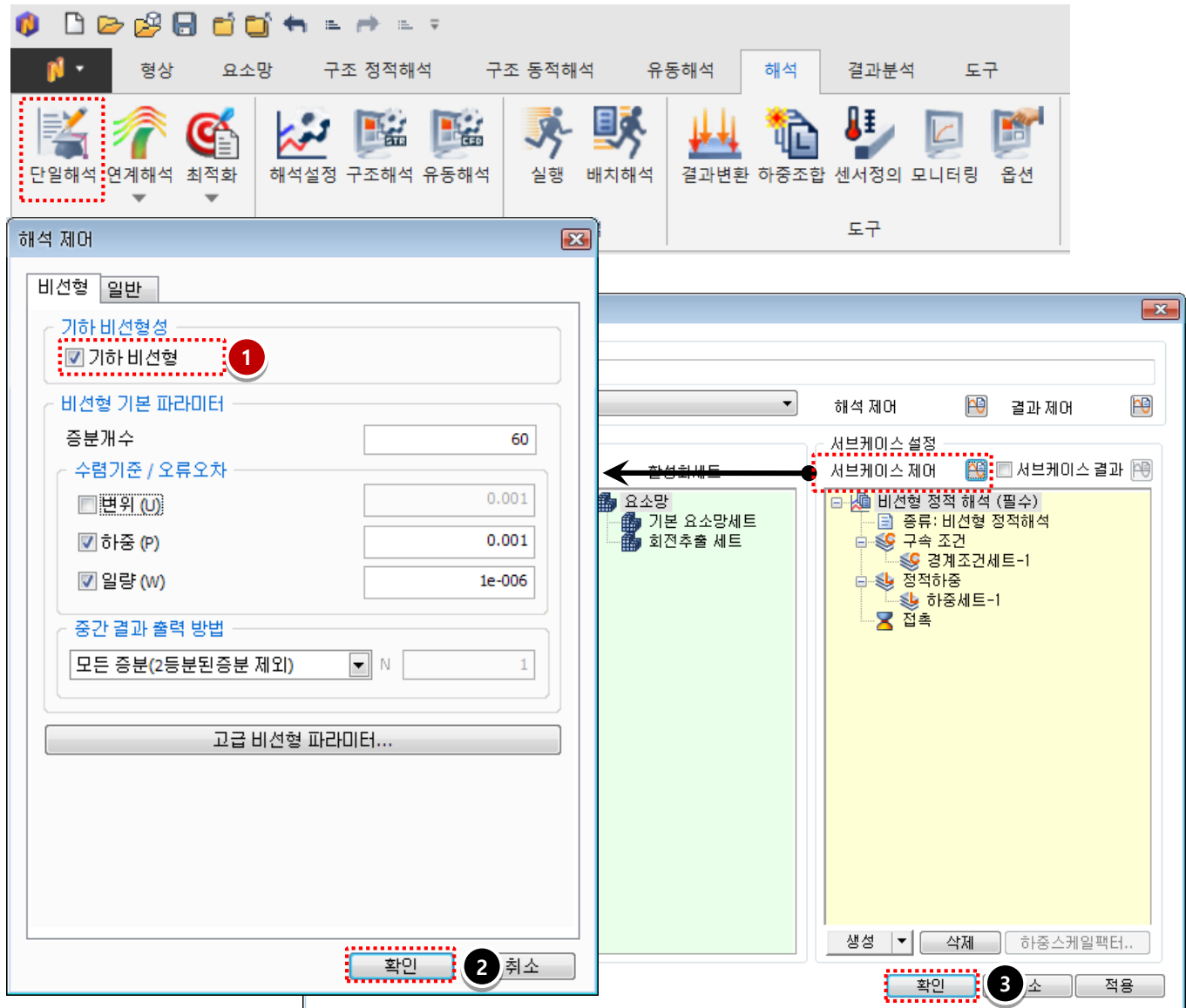


다음 페이지에서
계속 설명됩니다.

 기본적으로 현재 작업된 요소망세트, 경계조건, 하중조건 등이 모두 활성화됩니다.

작업순서

1. “기하비선형” 체크
2. [확인] 버튼 클릭.
3. [확인] 버튼 클릭.



The screenshot shows the Midas NFX software interface. The top menu bar includes options like '영상', '요소망', '구조 정적해석', '구조 동적해석', '유동해석', '해석', '결과분석', and '도구'. The '해석' (Analysis) menu is active, showing sub-options like '단일해석', '연계해석', '최적화', '해석설정', '구조해석', '유동해석', '실행', '배치해석', '결과변환', '하중조합', '센서정의', '모니터링', and '옵션'.

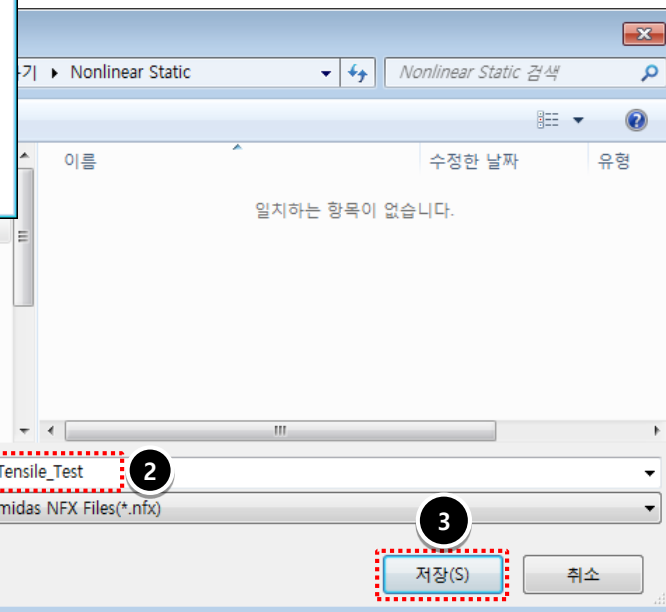
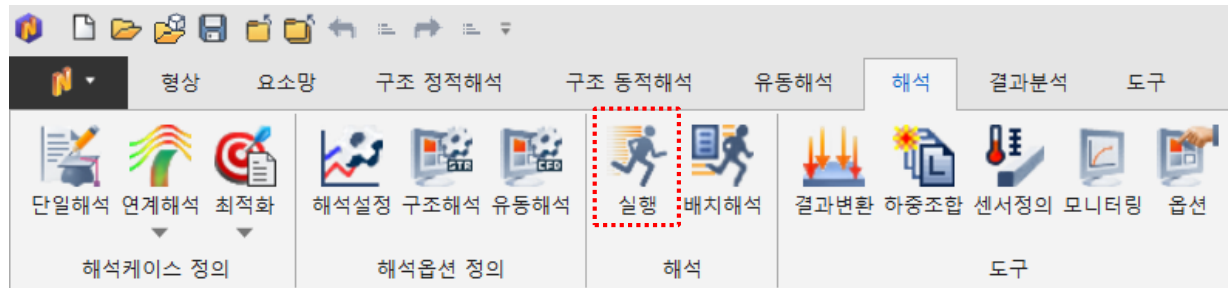
The '해석 제어' (Analysis Control) dialog box is open, showing the '비선형' (Nonlinear) tab. Under the '기하비선형성' (Geometric Nonlinearity) section, the '기하비선형' (Geometric Nonlinear) checkbox is checked, highlighted with a red dashed box and a circled '1'. Below this, the '비선형 기본 파라미터' (Nonlinear Basic Parameters) section includes fields for '증분개수' (Increment Count) set to 60, and '수렴기준 / 오류오차' (Convergence Criteria / Error) with options for '변위 (U)', '하중 (P)', and '일량 (W)'. The '중간 결과 출력 방법' (Intermediate Result Output Method) is set to '모든 증분(2등분된증분 제외)' (All increments (excluding 2-part increments)) with 'N' set to 1. A '고급 비선형 파라미터...' (Advanced Nonlinear Parameters...) button is at the bottom.

The '확인' (OK) button at the bottom of the dialog box is highlighted with a red dashed box and a circled '2'. The '확인' button in the bottom right corner of the main panel is also highlighted with a red dashed box and a circled '3'.

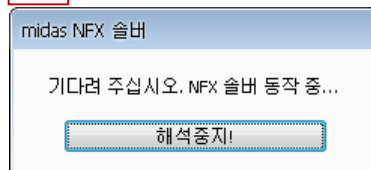
The main panel shows the '해석 제어' (Analysis Control) section with a tree view of the analysis setup. The '비선형 정적 해석 (필수)' (Nonlinear Static Analysis (Required)) is selected, showing sub-items like '종류: 비선형 정적해석', '구속 조건', '경계조건세트-1', '정적하중', and '하중세트-1'. The '확인' button in the bottom right corner of the main panel is highlighted with a red dashed box and a circled '3'.

작업순서



1. [확인] 버튼 클릭.
2. 다른 이름으로 저장: "Tensile_test" 입력.
3. [저장(S)] 버튼 클릭.

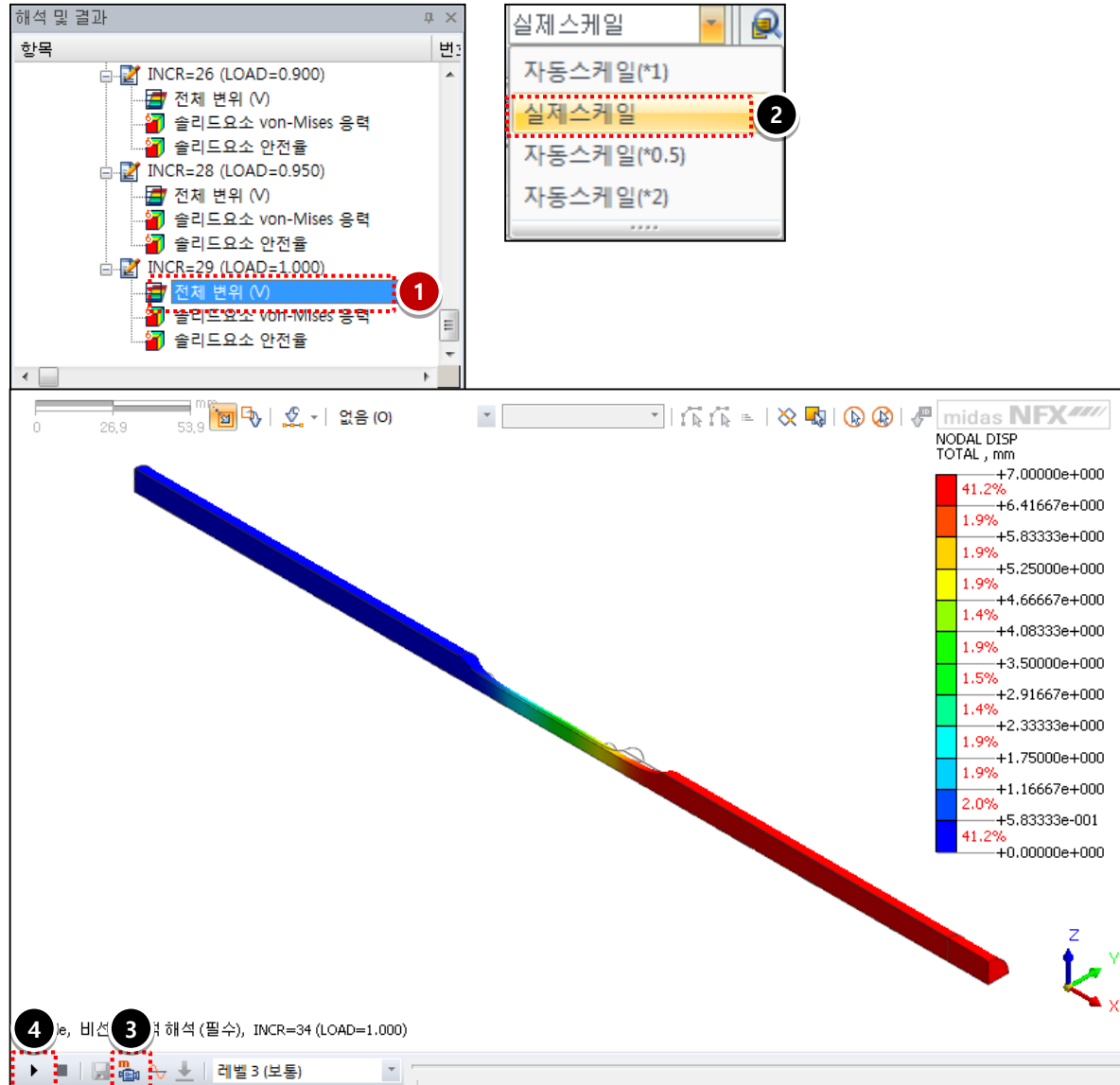


💡 해석을 실행하면 midas NFX 솔버가 작동됩니다. [해석중지!] 버튼을 클릭하면 해석이 중지됩니다.





작업순서


1. 해석 및 결과 작업트리에서 전체 변위 더블 클릭.
2. 해석 및 결과 >> 일반 >> 실제스케일로 변경
3. [] (멀티-스텝 애니메이션 녹화) 클릭.
4. [] (재생) 클릭.

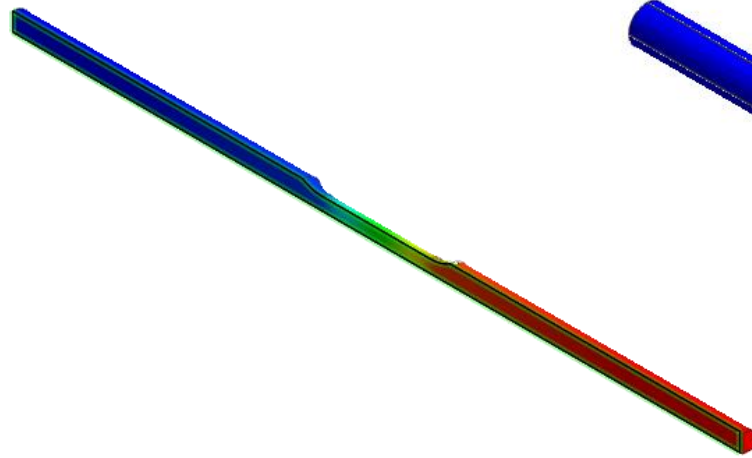
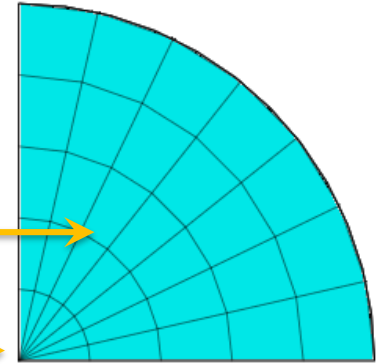


The screenshot shows the midas NFX software interface. The top-left window displays the analysis tree with 'INCR=29 (LOAD=1.000)' selected, and '전체 변위 (V)' highlighted with a red dashed box and a '1' callout. The top-right window shows the '실제스케일' (Actual Scale) menu with '실제스케일' selected, highlighted with a red dashed box and a '2' callout. The main window shows a 3D model of a tensile specimen with a color-coded displacement field. A legend on the right lists nodal displacements in mm, ranging from +7.00000e+000 to +0.00000e+000. The bottom-left corner shows the playback controls with a '4' callout on the play button and a '3' callout on the '레벨 3 (보통)' dropdown menu.

 멀티-스텝 애니메이션 녹화를 이용하면 스텝별 결과를 애니메이션으로 확인할 수 있습니다. (자동으로 전체 스텝 결과에 체크되어 있습니다.) 애니메이션 결과 확인이 끝나면 [] 버튼을 클릭하여 애니메이션 재생을 종료해 주어야 합니다. 이는 다른 후처리 작업 시 발생할 수 있는 조작의 불편함을 최소화하기 위한 작업입니다.

작업순서

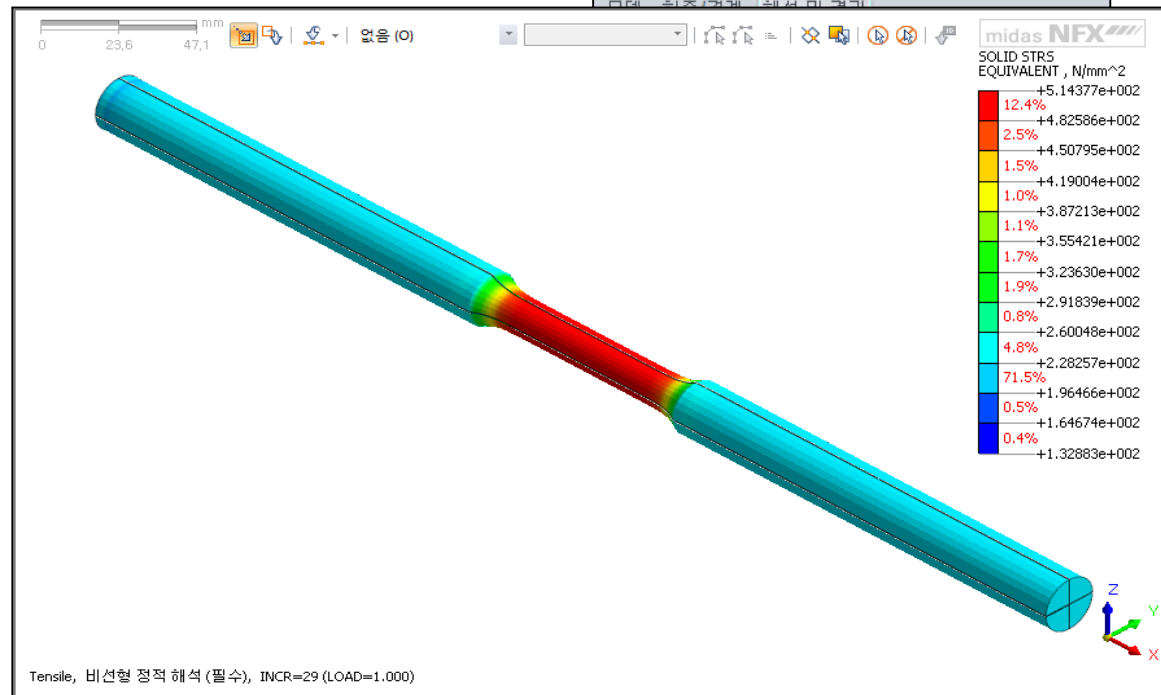
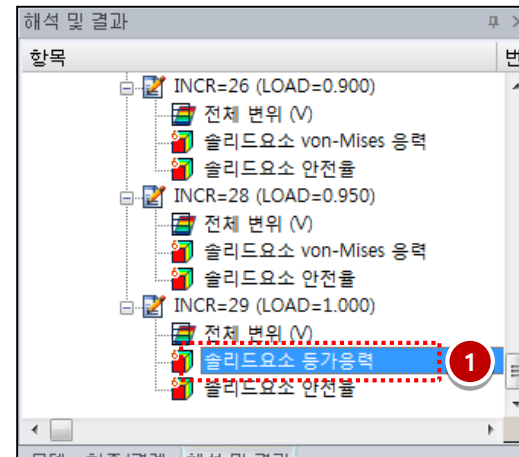
1. [] 대칭모델 보이기 아이콘 클릭.
2. 평면선택 1 (대칭 평면 설정)
3. 평면선택 2 (대칭되는 위치 설정)



작업순서

1. 해석 및 결과 작업트리에서
솔리드요소 등기응력 더블 클릭.
2. 결과분석 >> 보이기/감추기 >>
“절점평균” 체크 해제

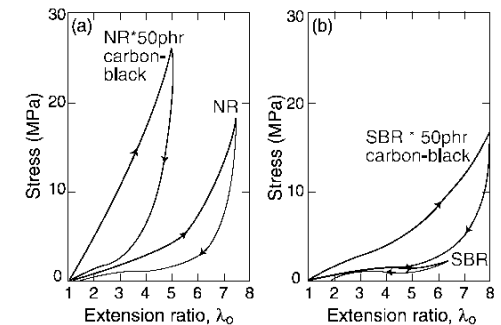
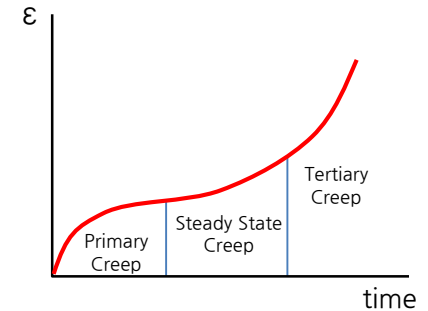
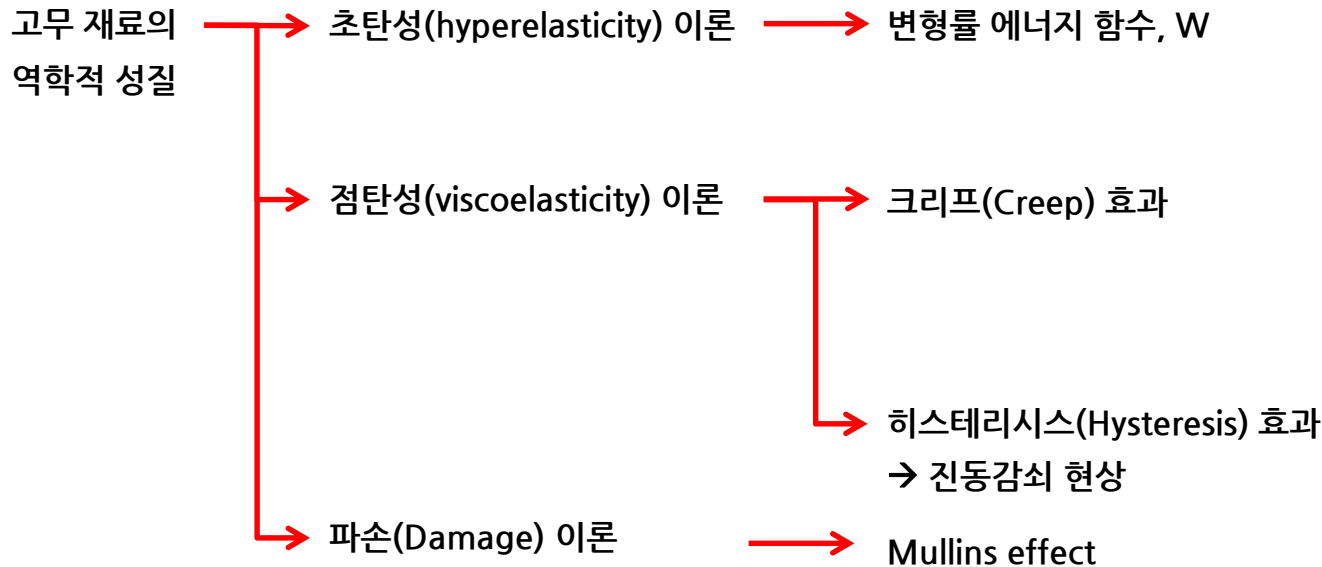
💡 재료비선형 해석의 경우에는 반드시 등가응력을 확인해야 합니다. 일부 부분에서 항복응력을 넘어서 소성구간에 들어선 것을 확인할 수 있습니다.



재료비선형(2) - 초탄성

고무재료

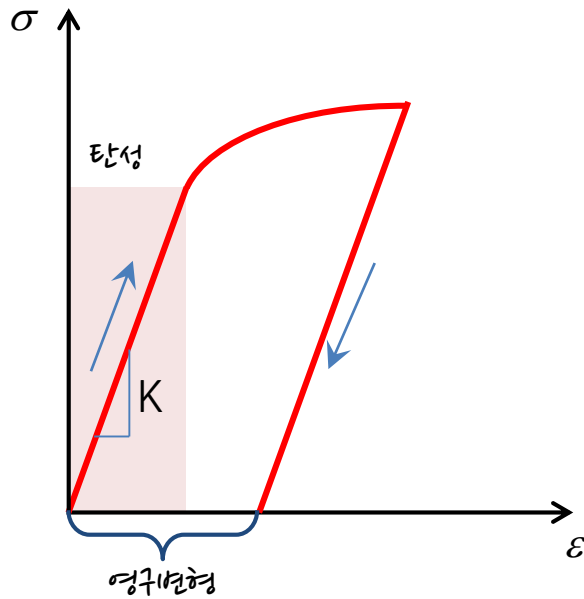
- 여러 개의 고분자 사슬이 복잡하게 연결되어 있기 때문에 **비압축성(incompressibility)**을 나타낸다.
- 금속 재료와는 다르게 과도한 변형이 발생해도 **비선형적인 탄성력이 유지된다.**
- 탄성 복원력, 진동 감쇠 특성, 에너지 흡수성 등이 우수하기 때문에 제진, 방진, 방음, 차폐를 목적으로 하는 기계요소에 많이 사용된다.



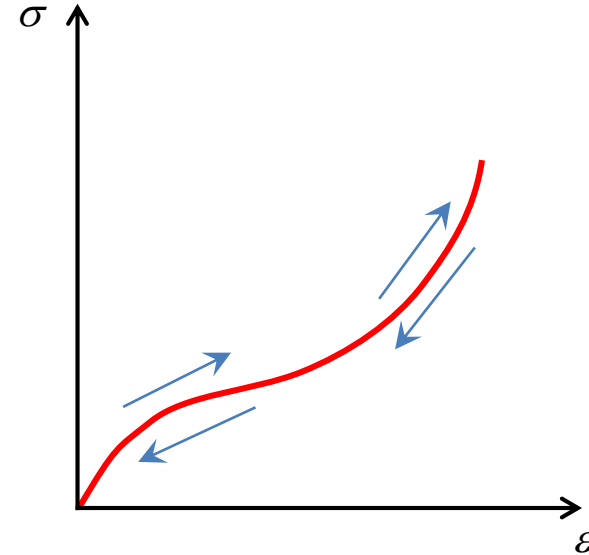
✓ 점탄성 이란?
시간에 따라 재료의 물성치가 변하는 현상

초탄성 재료란?

- ▶ 하중에 의해 물체의 변형이 약 500%이상 발생되더라도 하중을 제거했을 때, 원래의 형태로 돌아오는 재료
- ▶ 비선형 탄성재료이기 때문에 비선형 해석으로 검토를 하지만 선형해석과 같이 중첩의 원리를 적용할 수 있다.

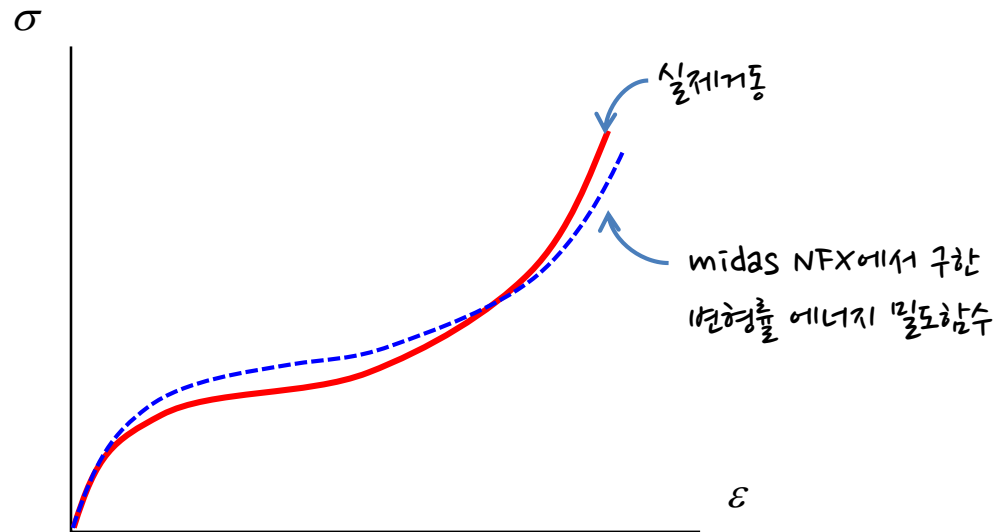


탄소성모델

초탄성 모델
→ 비선형 탄성에 속함

초탄성 재료의 특성은?

- 변형률 에너지 밀도 함수 (strain energy density function) 로 부터 응력을 유도할 수 있다.
- 변형률로 미분을 취하면 응력을 구할 수 있다.
- midas NFX 에서는 변형률 에너지 밀도 함수 W 로 Mooney-Rivlin, Polynomial, Ogden, Blatz-Ko 모델을 지원하고 있다.
- 고무의 응력-변형률 실험 데이터를 변형률 에너지 밀도 함수에 가장 근접하게 맞추는 것이 실제 거동을 잘 표현하게 한다.



변형률 에너지 밀도 함수(W)

✓ Polynomial

$$\begin{aligned}
 W(J_1, J_2, J_3) &= \underbrace{W_D(J_1, J_2)}_{\text{형상변화}} + \underbrace{W_H(J_3)}_{\text{체적변화}} \\
 &= \sum_{i+j=1}^{N_a} A_{ij} (J_1 - 3)^i (J_2 - 3)^j + \sum_{i=1}^{N_d} D_i (J_3 - 1)^{2i} \quad , (A_{ij}, D_i : \text{재료상수})
 \end{aligned}$$

✓ 높은 차수의 모델일수록 응력-변형률 실험데이터를 더 잘 표현할 수 있지만 더 많은 재료 상수가 필요하다

✓ Mooney-Rivlin 모델

$$W(J_1, J_2, J_3) = A_{10}(J_1 - 3) + A_{01}(J_2 - 3) + D(J_3 - 1)^2$$

→ Polynomial 형식에서 $N_a = 1$ 경우이다.

→ 가장 널리 사용되고 있는 모델이다. (모델의 정확도가 아닌 편의성 때문)

변형률 에너지 밀도 함수(W)

✓ Ogden 모델

$$W = \sum_{i+j=1}^{N_a} \frac{\mu_i}{\alpha_i} ((\lambda_1)^{\alpha_i} + (\lambda_2)^{\alpha_i} + (\lambda_3)^{\alpha_i} - 3) + \sum_{i=1}^{N_d} D_i (J_3 - 1)^{2i} \quad , (\alpha_i, \mu_i, D_i : \text{재료상수})$$

- 주 변형률 (J_1, J_2, J_3) 로 표시된 에너지 함수를 이용해서 재료의 거동을 명확하게 표현 하는 것이 어렵다. 특히 비선형성이 크거나 연신률이 높은 경우
- 재료상수의 물리적인 의미를 찾는 것이 아닌, 함수 자체의 물리적인 의미를 찾는 함수이다.

✓ Blatz-Ko 모델

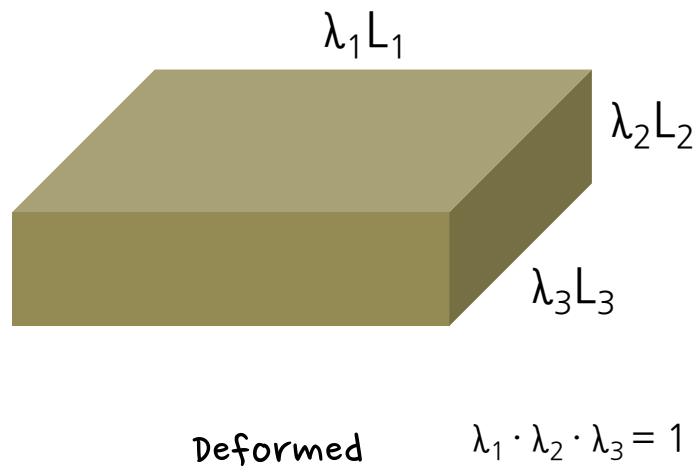
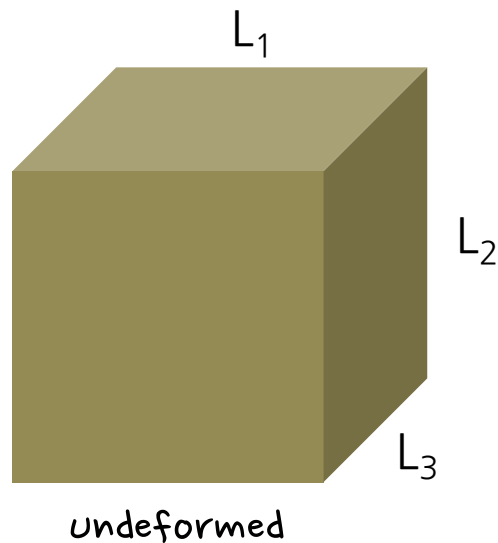
$$W = \frac{\mu}{2} \left(\frac{I_2}{I_3} + 2\sqrt{I_3} - 5 \right)$$

- 비압축성 성질이 강하지 않기 때문에 폼(Form) 재료에 많이 사용되며, 재료 상수는 초기 전단 강성 μ 만을 가진다.

변형률 에너지 밀도 함수(W)

✓ 용어정의 (J_1, J_2, J_3)

※ $J_1, J_2, J_3 = 1, 2, 3$ 차 변형률 불변량



$\lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 = 1 \rightarrow$ 비압축성이다.

$$\lambda_i = \frac{L_i + \Delta L_i}{L_i} = 1 + \varepsilon_i$$

$$J_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2$$

$$J_2 = \lambda_1^2 \cdot \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \cdot \lambda_3^2 + \lambda_3^2 \cdot \lambda_1^2$$

$$J_3 = \lambda_1^2 \cdot \lambda_2^2 \cdot \lambda_3^2$$

재료상수의 계산

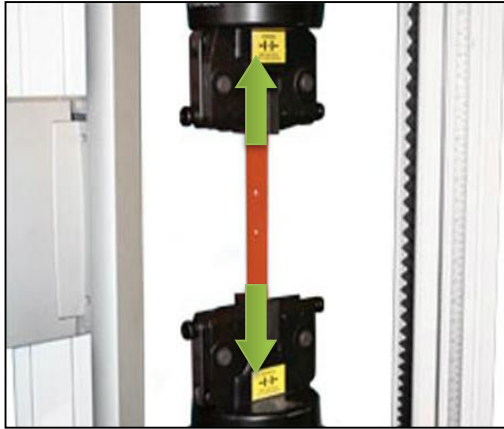
- ▶ 초탄성 재료의 경우, 탄소성 재료와는 달리 단축 인장 시험으로 모든 상수를 결정할 수 없으므로 여러 시험들의 결과를 조합해서 사용한다. → 지배적인 거동을 판단하여 선택적인 실험을 해도 됨.
- ▶ 탄소성재료는 진응력/진변형률이지만 **초탄성은 공칭응력/공칭변형률 데이터임**을 유의한다.
(Creep도 공칭응력/공칭변형률로 curve정의)

1. 단축 인장
2. 양축 인장
3. 단순 전단
4. 순수 전단
5. 체적 변화

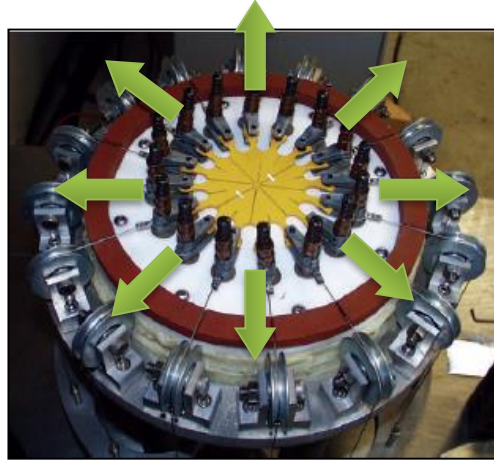


다음과 같은 실험을 통해서 **공칭응력/공칭변형률**을 측정
→ **최소 자승법**을 사용하여 재료 상수를 결정한다.

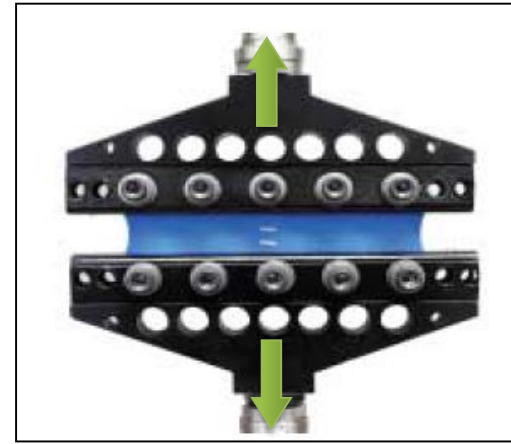
재료상수의 계산



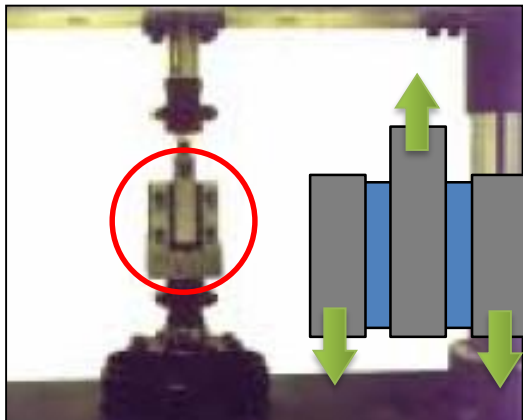
단순 인장



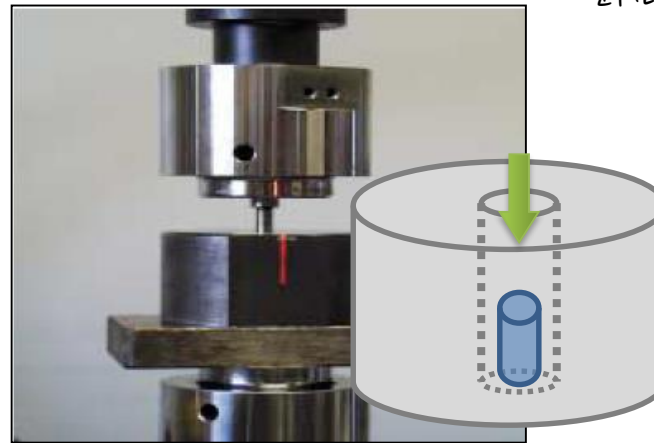
양축 인장 - 단순 압축 시험을 대체할 수 있다.



순수 전단 - 인장시험을 통해 얻은 결과를 45° 회전하여, 순수전단응력 계산



단순 전단



체적 변화 - 추구는 크게 만들고 재료는 작은 재료를 넣는다.
압축력은 강성이 크기때문에 추구의 연성이 결과에 반영되기 때문

응력-변형률 데이터를 이용한 재료상수 계산-1

① 재료 대화상자에서 초탄성 선택

② 모델 타입 설정

③ 실험데이터 변환 클릭

④ 실험 종류 선택

⑤ 실험데이터 입력

⑥ 계산식의 종류 및 차수 선택

⑦ 포아송비 또는 체적 변형 실험데이터 입력

⑧ 계산식의 종류 및 차수 선택

⑨ 실험 데이터 클릭

변형률/신장률	값
1	0.0000
2	0.0009
3	0.0018
4	0.0028
5	0.0046
6	0.0065
7	0.0101
8	0.0129
9	0.0147
10	0.0175
11	0.0230
12	0.0258
13	0.0295
14	0.0323
15	0.0387
16	0.0415

응력-변형률 데이터를 이용한 재료상수 계산-2

실험 데이터 평가 뷰어

종류	뒤들림 변형 차수	볼륨 변형 차수
Polynomial	1	1

뒤들림

A10	A01	A20	A11	A02						
0.59622477	1.18323858	0	0	0						
A30	A21	A12	A03	A40	A31	A22	A13	A04		
0	0	0	0	0	0	0	0	0		
A50	A41	A32	A23	A14	A05	0	0	0	0	0

볼륨

D1
1778.8702
D2
0
D3
0
D4
0
D5
0

그려질 그래프 선택

단순 인장/압축
 등가2축인장
 단순전단
 순수전단
 순수볼륨전단

보여줄 구간 0 ~ 0.39171

실험 갱신 **닫기**

단순 인장/압축

단순전단

등가2축인장

순수볼륨전단

순수전단

재료 안정성 한계치 정보

Uniaxial tension : stable
 Uniaxial compression : unstable at a nominal strain less than = -0.5100
 Equibiaxial tension : stable
 Equibiaxial compression : stable
 Pure shear tension : stable
 Pure shear compression : unstable at a nominal strain less than = -0.5900
 UNSTABLE HYPERELASTIC MATERIAL

⑩ 재료 안정성 한계치 정보를 확인 후, 닫기 버튼 클릭

응력-변형을 데이터를 이용한 재료상수 계산-3

재료

번호: 2 이름: 등방성 색상: [Yellow]

All

17-4PH, H1100
AISI 1020
AISI 1060
AISI 304 SS Annealed
AISI_310_SS
AISI_410_SS
AISI_Steel_1005
AISI_Steel_1008-HR
AISI 4340 Annealed
AISI_Steel_Maraging
Alloy Steel
Cast Alloy Steel
Cast Carbon Steel
Cast Stainless Steel
Chrome Stainless Steel
FC250
Galvanized Steel
H-1(CR60)
HL-4000
Hp-1
Hp-4
Inconel_718_Aged
Plain Carbon Steel
S/Steel_PH15-5
S45C
SAPH-400
SE508
SGACC
SGACEN
SGARC340-E
SGCC
SGCD1
SHP
SM45C
SM490A(KS)
SPCC
SPDE
SPRC340
SR-0300
Steel
Steel_Rolled
SUP12
SUS304
SUS316
SUS316L
Wrought Stainless Steel
Ductile Iron
Gray Cast Iron
Iron_40
Iron_60
Iron_Cast_G25

구조
질량밀도: 0 kg/mm³ 열팽창계수: 0
기준온도: 0 [T]

모델 종류: Polynomial
뒤틀림 변형에너지 다항식의 차수: 1
볼륨 변형에너지 다항식의 차수: 1

변형 상수
프와송비: 0.4995

뒤틀림
A10: 0.59622477 A01: 1.18323585

볼륨
D1: 1778.8702 D2: 0 D3: 0

단위: N/mm²

실험 데이터 변환...

확인 취소 적용

Mooney-Rivlin 모델

$$W = A_{10}(J_1 - 3) + A_{01}(J_2 - 3) + D(J_3 - 1)^2$$

실험 데이터 변환

실험 데이터 세트
종류: 단순 인장/압축
함수 이름: BI
추가 수정 삭제

종류	함수 이름
단순 인장/압축	UNI
등가 2축 인장	BI

볼륨 변형에 쓰일 방법
 데이터를 사용 없음
 프와송비 0.4995

계산시 사용할 데이터 범위: 0.000000 ~ 0.391710

계산식의 특성
 종류: Polynomial
 뒤틀림 변형 차수: 1
 볼륨 변형 차수: 1
 추가 수정 삭제

종류	뒤틀림 변형 차수	볼륨 변형 차수
Polynomial	1	1

계산시 사용할 오차 기준: 상대적인 오차
 특이값을 제외하기 위한 상태수: 10000

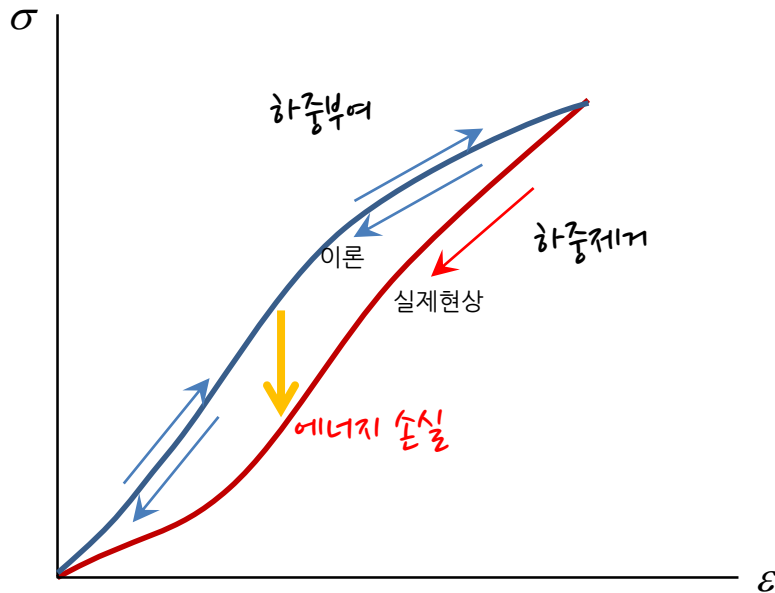
실험 데이터 계산... 저장 닫기

⑩ 저장 버튼 클릭 후, 닫기 버튼 클릭

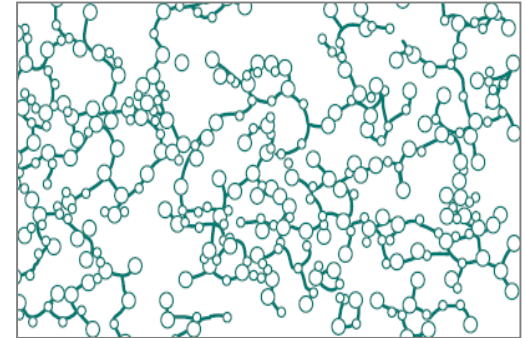
⑪ 확인 버튼 클릭

Hysteresis 효과

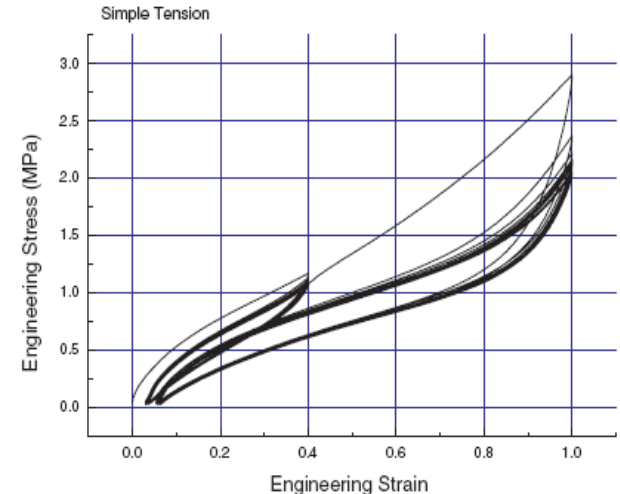
- 고무는 고분자 사슬의 형태로 복잡하게 이루어져 있고 하중을 가하게 되면 서로 부딪히며 마찰을 일으켜서 에너지의 손실이 발생한다.



고무 분자구조

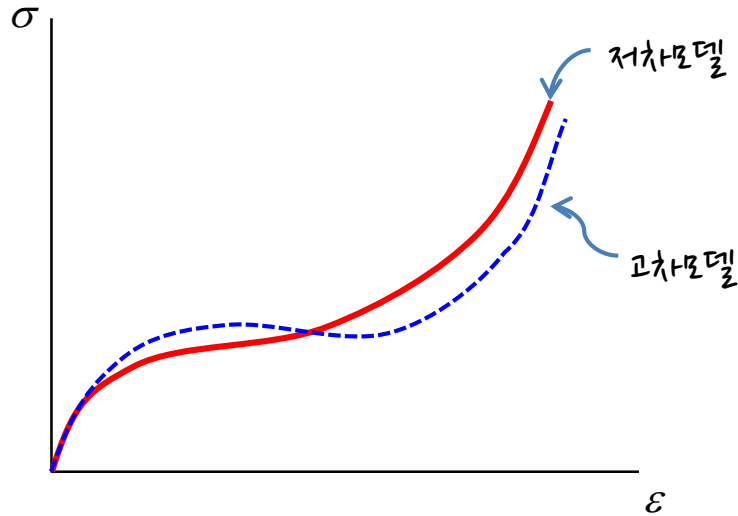


- 응력연화(Mullin's 효과) : 하중을 처음 받는 고무재료의 응력-변형률 곡선이 처음 몇 주기 동안 많이 변하며 안정화 되어가는 현상



초탄성 해석 시 주의사항

- ① 국부적으로 기울기가 음의 값을 가질 수 있으므로 저차모델이 안정적인 값을 가진다.



→ Curve Fitting 후, 이런 현상이 발생하면
저차 모델로 바꾸는 것이 좋다.
(곡선에 음의 기울기가 존재하는 경우)

- ② 탄소성 재료는 본 미세스 응력을 주로 보지만, 초탄성 재료에서는 압축 응력이 주 관심 항목이다.

$$A_{10}, A_{01} \ll D_1, \quad W_D \ll W_H$$

즉, 형상변화에 의한 응력은 체적변화에 의한 응력보다 상대적으로 크기가 작음

- ③ 초탄성은 고무재료의 복잡한 현상 중 비선형 탄성 부분만 고려한 것이다. (점성, Hyseresis 등은 포함되어 있지 않다)

개요

➤ 선형정적해석

- 단위 : N, mm
- bootseal.nfx

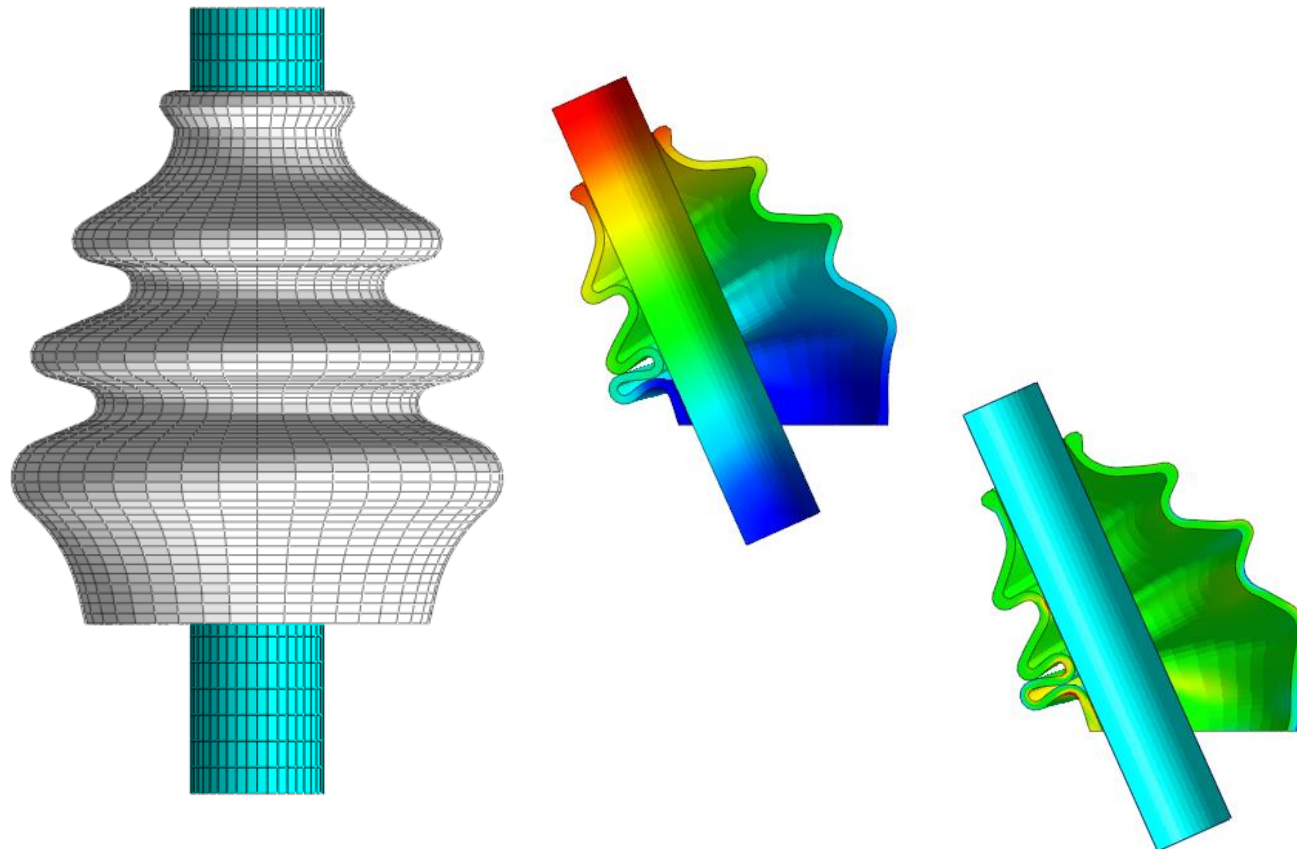
➤ 경계조건과 하중조건

- 경계조건 (고정구속)
- 강제 변위

➤ 결과확인

- 전체 변위
- 압축응력
- 애니메이션

Rubber Bootseal



따라하기 목적

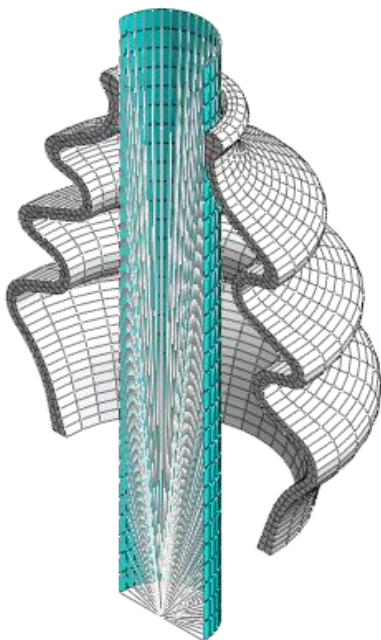
➤ 재료비선형의 이해 (초탄성)

- 초탄성 재료를 정의하는 방법을 습득합니다.
- 초탄성 재료 사용시 보아야 하는 결과값에 대해 알아봅니다.

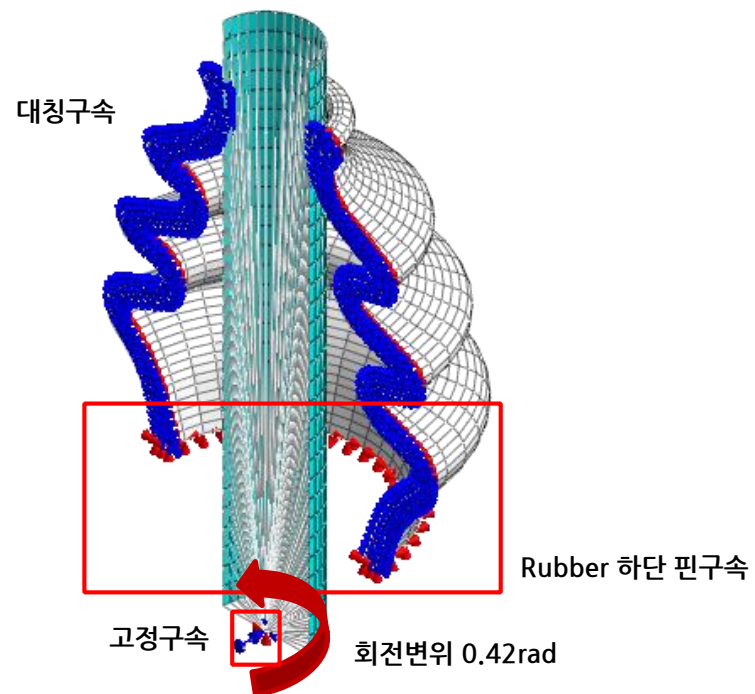
➤ 강체 요소를 사용하여 경계조건 및 하중조건을 적용하기

해석 개요


➤ 대상 모델

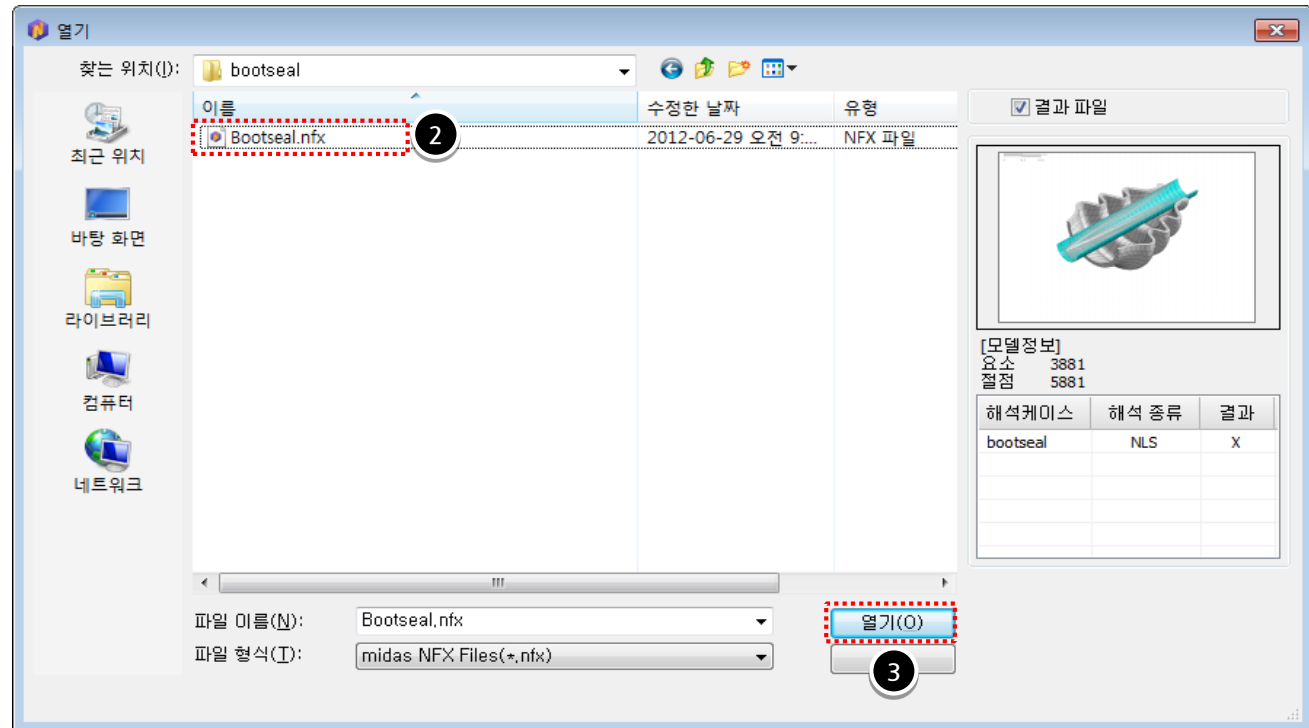


➤ 경계조건 및 하중조건



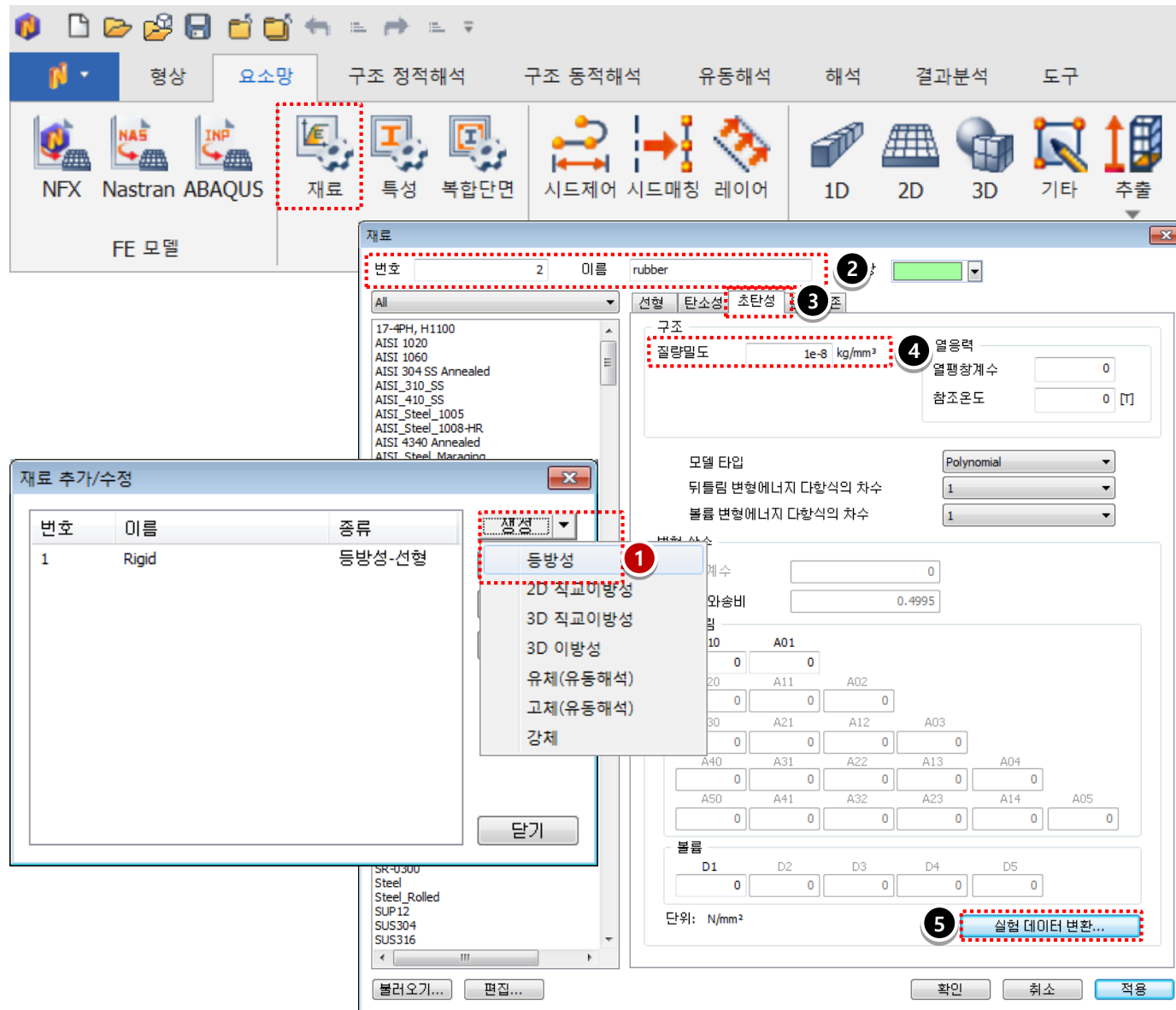
작업순서

1. [] (열기) 클릭.
2. “bootseal.nfx” 선택.
3. [열기] 버튼 클릭.




작업순서

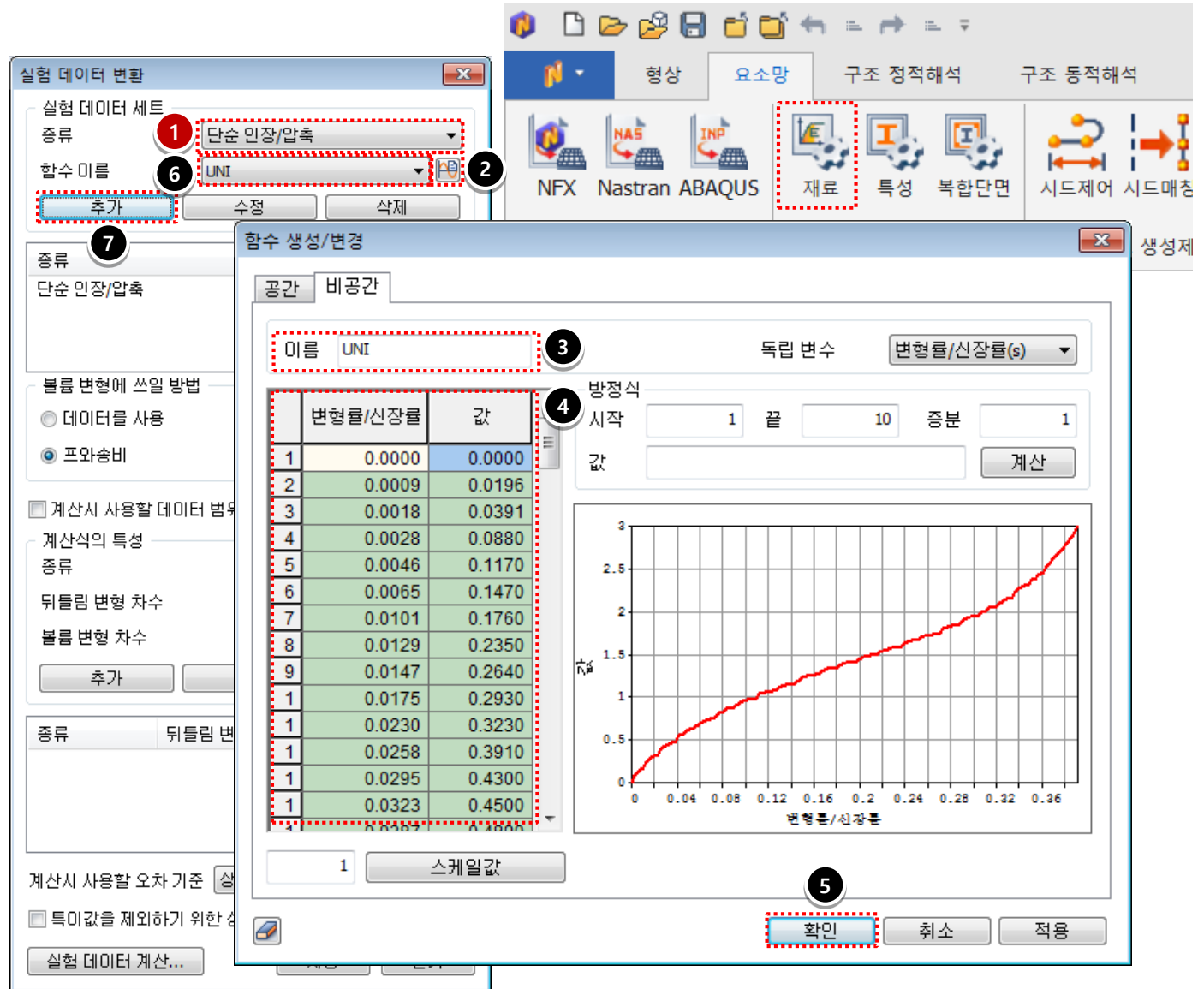
1. 생성 >> 등방성 클릭.
2. “번호:2, 이름: Rubber” 입력.
3. [초탄성] 탭 클릭.
4. 질량밀도 : “1e-8(kg/mm³)” 입력.
5. [실험 데이터 변환...] 버튼 클릭.



The screenshot shows the midas NFX software interface. The main window displays the '재료' (Material) dialog box, which is used for defining material properties. The '초탄성' (Hyperelastic) tab is selected, and the '구조' (Structure) section shows '질량밀도' (Density) set to 1e-8 kg/mm³. The '재료 추가/수정' (Material Add/Edit) dialog is also open, showing a list of materials with 'Rigid' selected. A context menu is open over the '재료 추가/수정' dialog, with '등방성' (Isotropic) selected. The '재료' dialog shows '번호: 2' and '이름: rubber'. The '초탄성' tab shows '구조: 질량밀도 1e-8 kg/mm³'. The '실험 데이터 변환...' button is highlighted.

작업순서

1. 실험데이터 세트 종류 : “단순 인장/압축”
2. [] (함수생성) 버튼 클릭.
3. 이름 : “UNI” 입력.
4. 변형률/신장률-값 그래프데이터 입력
(엑셀시트에서 Copy & Paste)
5. [확인] 버튼 클릭.
6. 함수이름 : “UNI” 선택.
7. [추가] 버튼 클릭.



실험 데이터 변환

실험 데이터 세트
 종류 ① 단순 인장/압축
 함수 이름 ⑥ UNI ②
 추가 수정 삭제

종류 ⑦
 단순 인장/압축

볼륨 변환에 쓰일 방법
 데이터를 사용
 프와송비

계산시 사용할 데이터 범위

계산식의 특성
 종류
 뒤틀림 변형 차수
 볼륨 변형 차수
 추가

종류 뒤틀림 변

계산시 사용할 오차 기준 특이값을 제외하기 위한
 실험 데이터 계산...

함수 생성/변경

공간 비공간

이름 UNI ③ 독립 변수 변형률/신장률(s)

방정식
 시작 1 끝 10 증분 1
 값 계산


	변형률/신장률	값
1	0.0000	0.0000
2	0.0009	0.0196
3	0.0018	0.0391
4	0.0028	0.0880
5	0.0046	0.1170
6	0.0065	0.1470
7	0.0101	0.1760
8	0.0129	0.2350
9	0.0147	0.2640
1	0.0175	0.2930
1	0.0230	0.3230
1	0.0258	0.3910
1	0.0295	0.4300
1	0.0323	0.4500

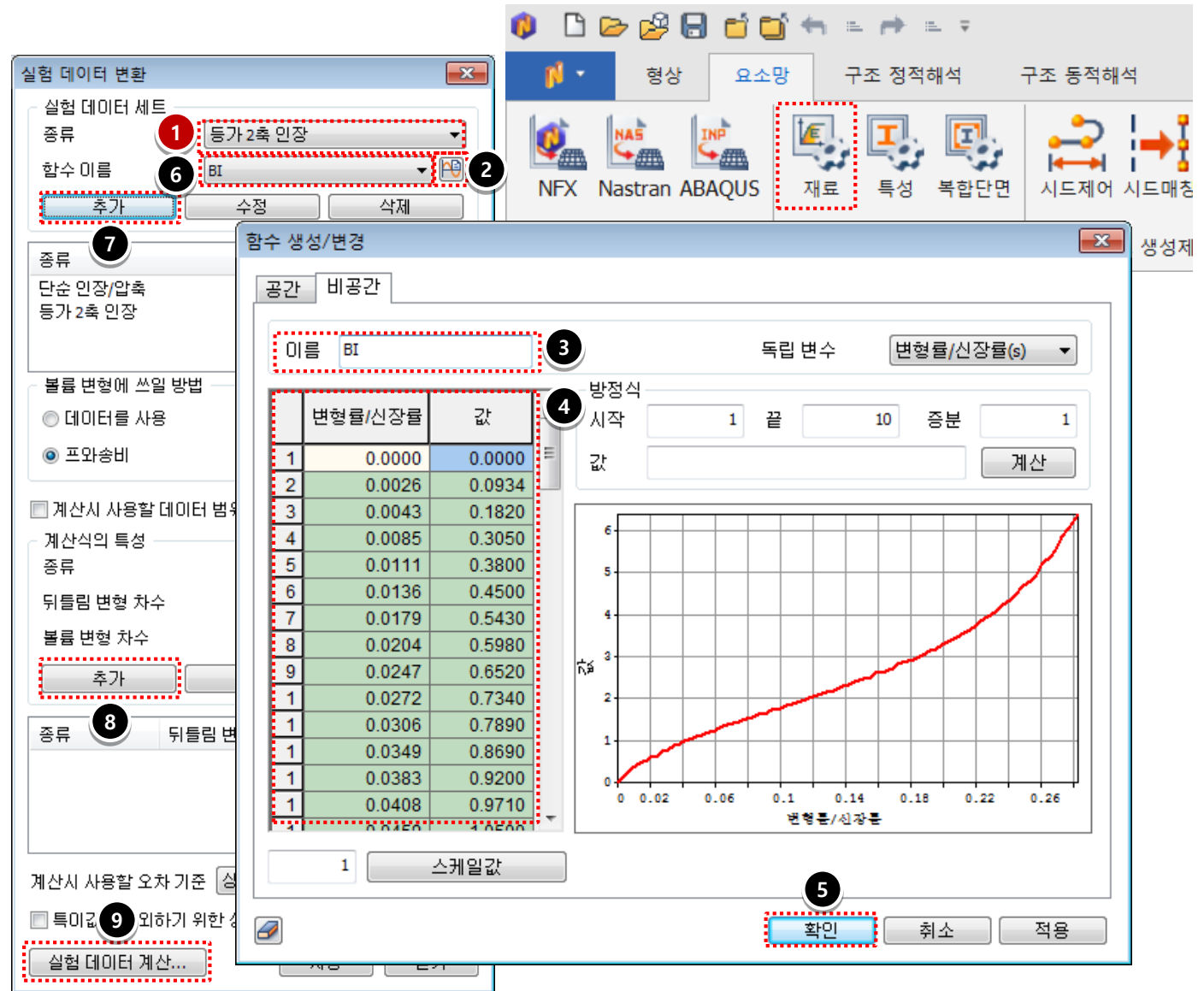
1 스케일값

⑤ 확인 취소 적용

그래프: 값 (Y축) vs. 변형률/신장률 (X축). 곡선은 0에서 0.36까지 증가하며, 값은 0에서 3.0까지 증가한다.

작업순서

1. 실험데이터 세트 종류 : “등가2축 인장”
2. [] (함수생성) 버튼 클릭.
3. 이름 : “ BI ” 입력.
4. 변형률/신장률-값 그래프데이터 입력
(엑셀시트에서 Copy & Paste)
5. [확인] 버튼 클릭.
6. 함수이름 : “ BI ” 선택.
7. [추가] 버튼 클릭.
8. [추가] 버튼 클릭.
9. [실험 데이터 계산...] 버튼 클릭.



실험 데이터 변환

실험 데이터 세트
 종류 1 등가 2축 인장
 함수 이름 6 BI 2
 추가 수정 삭제

종류 7
 단순 인장/압축
 등가 2축 인장

볼륨 변형에 쓰일 방법
 데이터를 사용
 프와송비

계산시 사용할 데이터 범위

계산식의 특성
 종류
 뒤틀림 변형 차수
 볼륨 변형 차수
 추가 8

종류 8 뒤틀림 변

계산시 사용할 오차 기준 상

특이값 9 외하기 위한 상

실험 데이터 계산...

함수 생성/변경

공간 비공간

이름 BI 3 독립 변수 변형률/신장률(s)

방정식
 시작 1 끝 10 증분 1
 값 계산

	변형률/신장률	값
1	0.0000	0.0000
2	0.0026	0.0934
3	0.0043	0.1820
4	0.0085	0.3050
5	0.0111	0.3800
6	0.0136	0.4500
7	0.0179	0.5430
8	0.0204	0.5980
9	0.0247	0.6520
1	0.0272	0.7340
1	0.0306	0.7890
1	0.0349	0.8690
1	0.0383	0.9200
1	0.0408	0.9710

1 스케일값

5 확인 취소 적용

그래프: 값 (Y축) vs. 변형률/신장률 (X축). 곡선은 변형률/신장률에 따라 값이 증가하는 비선형 관계를 보여줍니다.

작업순서

1. [닫기] 버튼 클릭.

실험 데이터 평가 뷰어

종류	뒤틀림 변형 차수	볼륨 변형 차수
Polynomial	1	1

뒤틀림

A10	A01	볼륨			
0.59620763	1.18322862	D1 1778.84311			
A20	A11	A02	D2 0		
0	0	0	D3 0		
A30	A21	A12	A03	D4 0	
0	0	0	0	D5 0	
A40	A31	A22	A13	A04	0
0	0	0	0	0	0
A50	A41	A32	A23	A14	A05
0	0	0	0	0	0

그려질 그래프 선택

단순 인장/압축 등가2축인장 단순전단 순수전단

순수볼륨전단

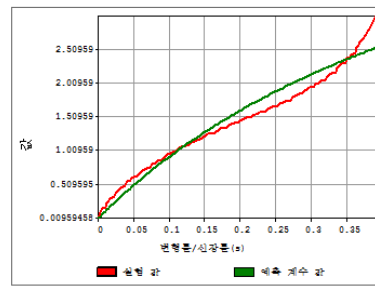
보여줄 구간 0 ~ 0.3917

실험 1 닫기

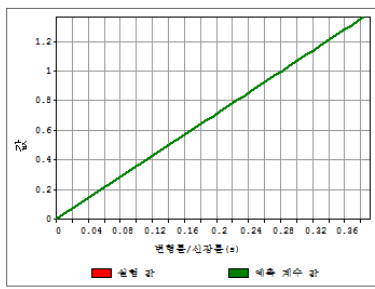
재료 안정성 한계치 정보

Uniaxial tension : stable
 Uniaxial compression : unstable at a nominal strain less than = -0.5100
 Equibiaxial tension : stable
 Equibiaxial compression : stable
 Pure shear tension : stable
 Pure shear compression : unstable at a nominal strain less than = -0.5900
 UNSTABLE HYPERELASTIC MATERIAL

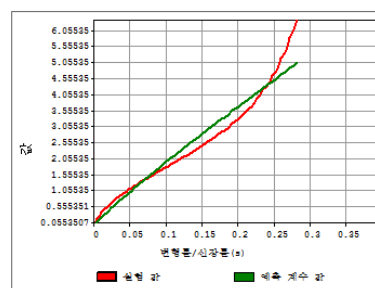
단순 인장/압축



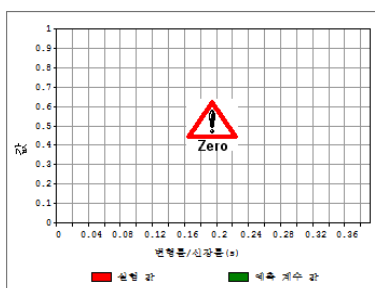
단순전단



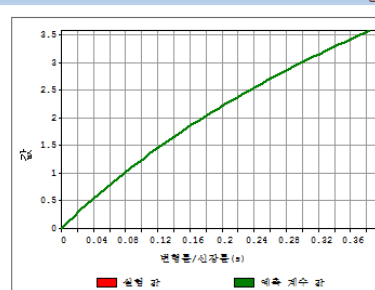
등가2축인장



순수볼륨전단

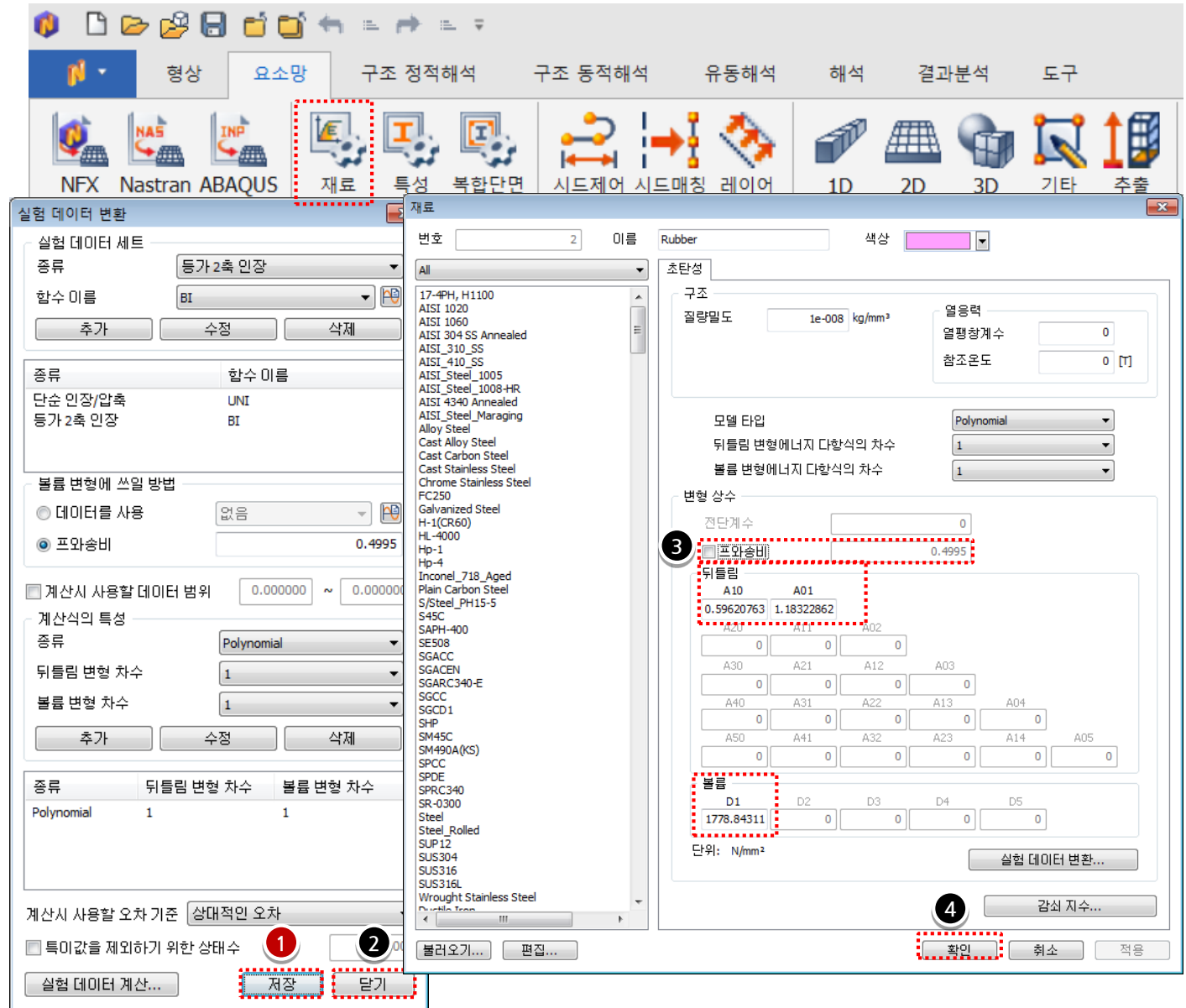


순수전단



작업순서

1. [저장] 버튼 클릭.
2. [닫기] 버튼 클릭.
3. “프아송비” 체크 해제
4. [확인] 버튼 클릭.



실험 데이터 변환

실험 데이터 세트
 종류: 등가 2축 인장
 합수 이름: BI
 추가 수정 삭제

종류: 합수 이름
 단순 인장/압축: UNI
 등가 2축 인장: BI

볼륨 변형에 쓰일 방법
 데이터를 사용 (없음)
 프아송비 (0.4995)

계산시 사용할 데이터 범위: 0.000000 ~ 0.000000

계산식의 특성
 종류: Polynomial
 뒤틀림 변형 차수: 1
 볼륨 변형 차수: 1
 추가 수정 삭제

종류: 뒤틀림 변형 차수: 볼륨 변형 차수
 Polynomial: 1: 1

계산시 사용할 오차 기준: 상대적인 오차
 특이값을 제외하기 위한 상태수: 1

실험 데이터 계산... 저장 닫기

재료

번호: 2 이름: Rubber 색상: [색상]
 All
 17-4PH, H1100
 AISI 1020
 AISI 1060
 AISI 304 SS Annealed
 AISI_310_SS
 AISI_410_SS
 AISI_Steel_1005
 AISI_Steel_1008-HR
 AISI 4340 Annealed
 AISI_Steel_Maraging Alloy Steel
 Cast Alloy Steel
 Cast Carbon Steel
 Cast Stainless Steel
 Chrome Stainless Steel
 FC250
 Galvanized Steel
 H-1(CR60)
 HL-4000
 Hp-1
 Hp-4
 Inconel_718_Aged
 Plain Carbon Steel
 S/Steel_PH15-5
 S45C
 SAPH-400
 SE508
 SGACC
 SGACEN
 SGARC340-E
 SGCC
 SGCD1
 SHP
 SM45C
 SM490A(KS)
 SPCC
 SPDE
 SPRC340
 SR-0300
 Steel
 Steel_Rolled
 SUP12
 SUS304
 SUS316
 SUS316L
 SUS316L
 Wrought Stainless Steel
 Zr-2.5Nb

번호: 2 이름: Rubber 색상: [색상]

초탄성

구조: 1e-008 kg/mm³
 열팽창계수: 0
 열팽창계수: 0
 참조온도: 0 [T]

모델 타입: Polynomial
 뒤틀림 변형에너지 다항식의 차수: 1
 볼륨 변형에너지 다항식의 차수: 1

변형 상수

전단계수: 0
 프아송비: 0.4995

뒤틀림
 A10 A01
 0.59620763 1.18322862
 A2U A1I A02
 0 0 0
 A30 A21 A12 A03
 0 0 0 0
 A40 A31 A22 A13 A04
 0 0 0 0 0
 A50 A41 A32 A23 A14 A05
 0 0 0 0 0 0

볼륨
 D1 D2 D3 D4 D5
 1778.84311 0 0 0 0
 단위: N/mm²

실험 데이터 변환...
 감시 지수...
 확인 취소 적용

작업순서

1. RUBBER - 3D 선택 후,

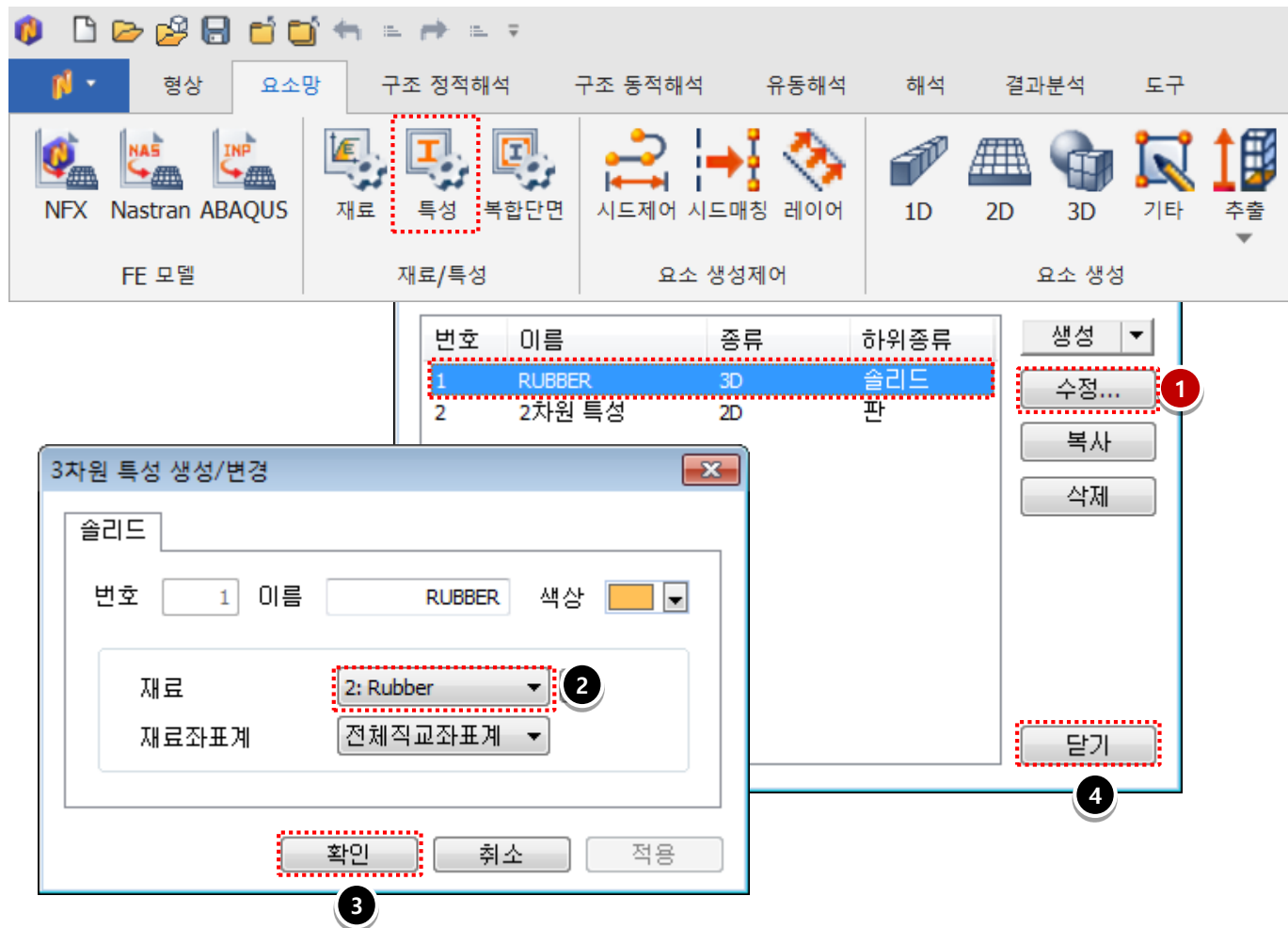
[수정] 버튼 클릭.

2. 특성 수정

번호	1
이름	Rubber
재질	2: Rubber

3. [확인] 버튼 클릭.

4. [닫기] 버튼 클릭.



The screenshot shows the software interface with the following elements:

- Toolbar:** Includes icons for NFX, Nastran, ABAQUS, FE 모델, 재료, 특성, 복합단면, 시드제어, 시드매칭, 레이어, 1D, 2D, 3D, 기타, and 추출.
- Property Table:**

번호	이름	종류	하위종류
1	RUBBER	3D	솔리드
2	2차원 특성	2D	판
- 3차원 특성 생성/변경 Dialog Box:**
 - 타입: 솔리드
 - 번호: 1, 이름: RUBBER, 색상: [Orange]
 - 재료: 2: Rubber (highlighted with a red dashed box and circle 2)
 - 재료좌표계: 전체직교좌표계
 - Buttons: 확인 (highlighted with a red dashed box and circle 3), 취소, 적용
- Right Panel:**
 - Buttons: 생성, 수정... (highlighted with a red dashed box and circle 1), 복사, 삭제
 - Bottom button: 닫기 (highlighted with a red dashed box and circle 4)

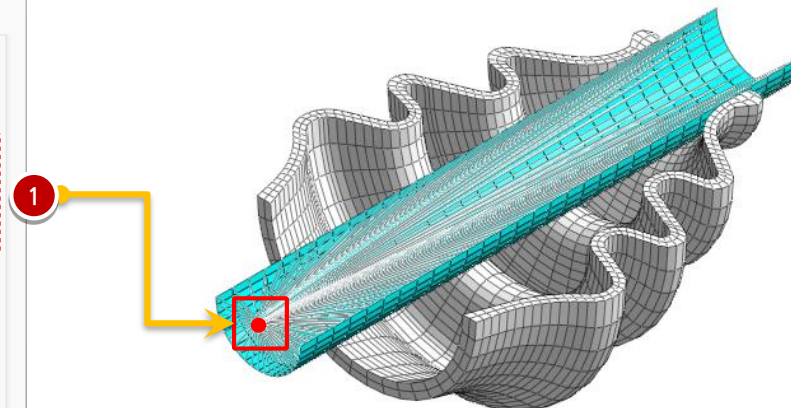
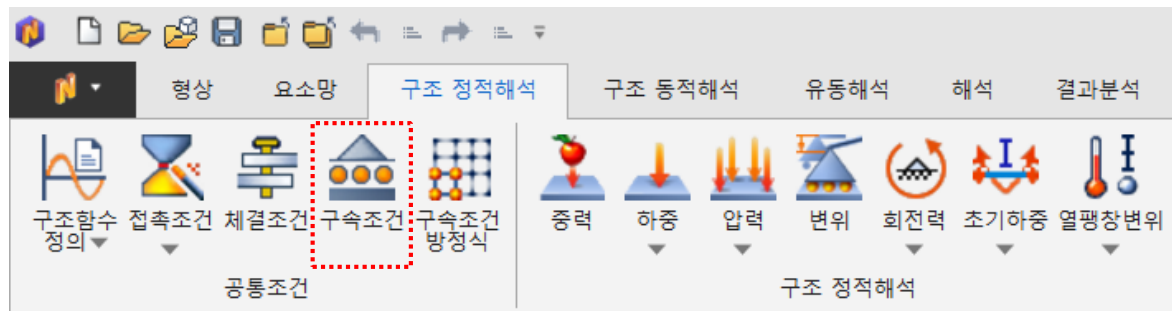
작업순서

1. 구속조건 입력


이름	Rigid
대상종류	절점
대상선택	1개 선택(그림참조)
조건	고정구속
경계조건세트	Rigid 구속

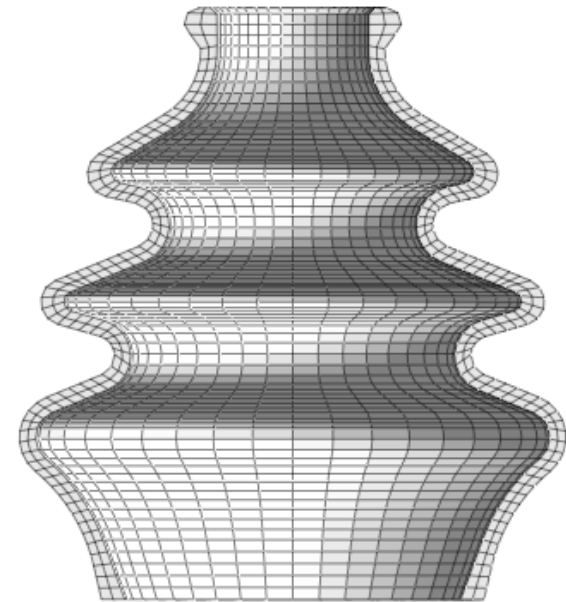
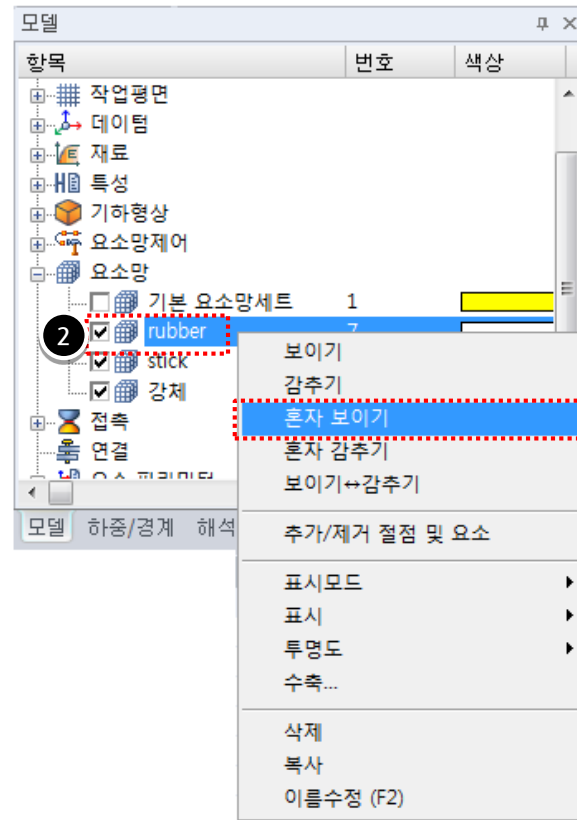
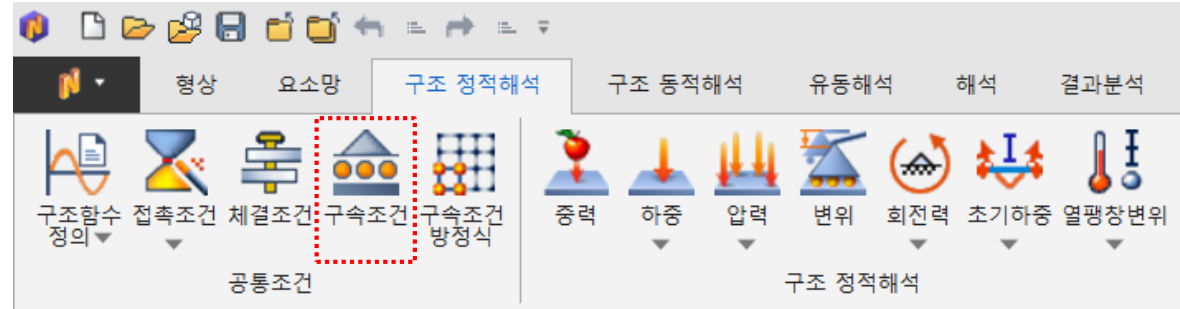
2. [확인] 버튼 클릭.

강체요소는 마스터 절점에 경계조건 및 하중조건을 적용해야 합니다.
종속절점에 경계조건이나 하중조건이 주어지게 되면 에러가 발생합니다.



작업순서

1. [] (윗면 보기) 클릭.
2. 모델 작업트리에서
요소망 >> rubber 선택
3. 오른쪽 버튼 클릭 후, “혼자 보이기”



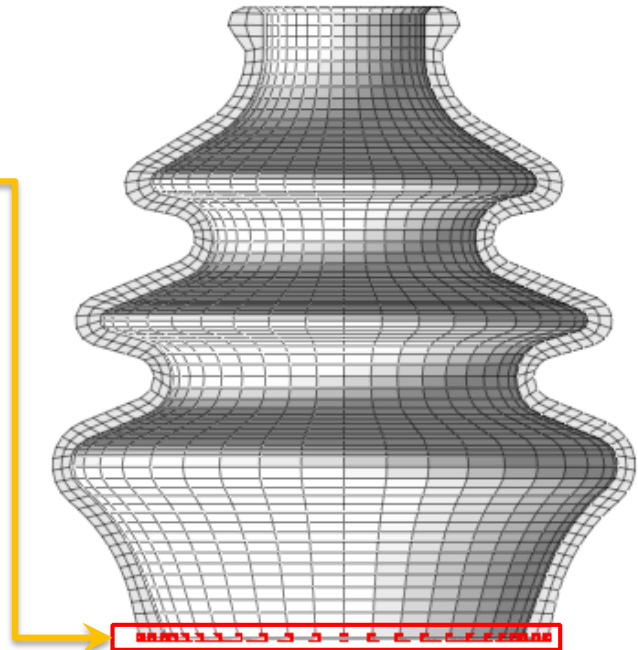
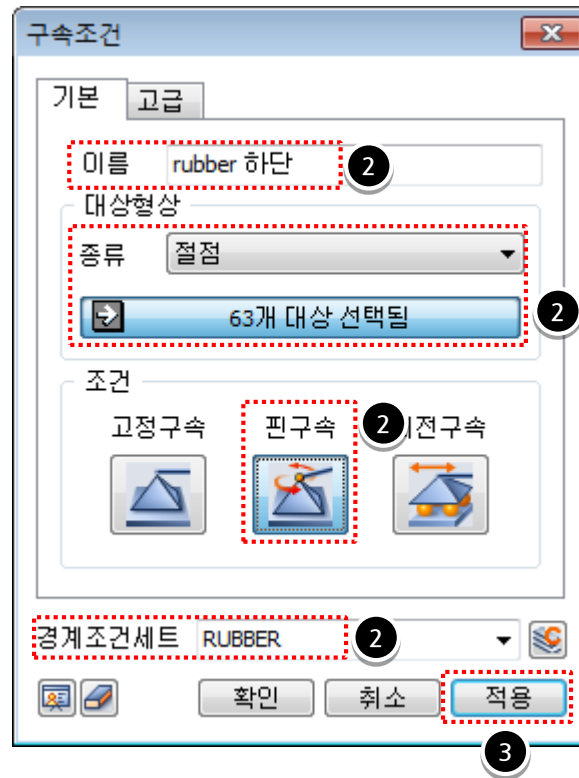
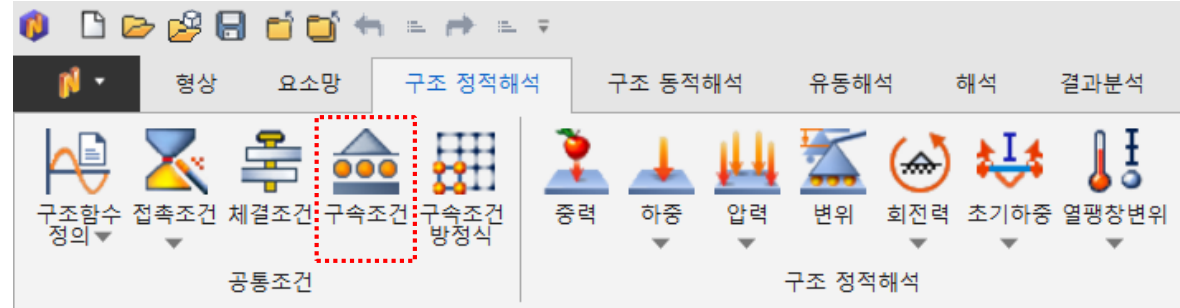
작업순서

1. [] (윗면 보기) 클릭.

2. 구속조건 입력

이름	Rubber하단
대상종류	절점
대상선택	63개 선택(그림참조)
조건	핀구속
경계조건세트	Rubber

3. [적용] 버튼 클릭.

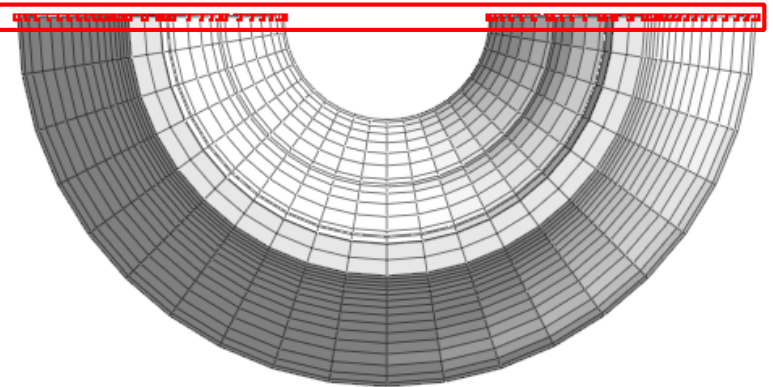
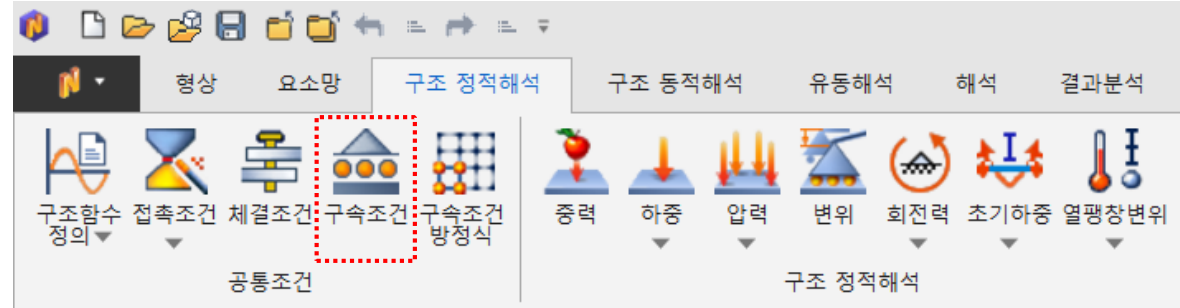


작업순서

1. [] (정면 보기) 클릭.
2. [고급] 탭 클릭.
3. 대칭조건 입력

이름	대칭구속
대상종류	절점
대상선택	498개 선택 (그림참조)
대칭평면	XY평면
경계조건세트	대칭구속

4. [확인] 버튼 클릭.



작업순서

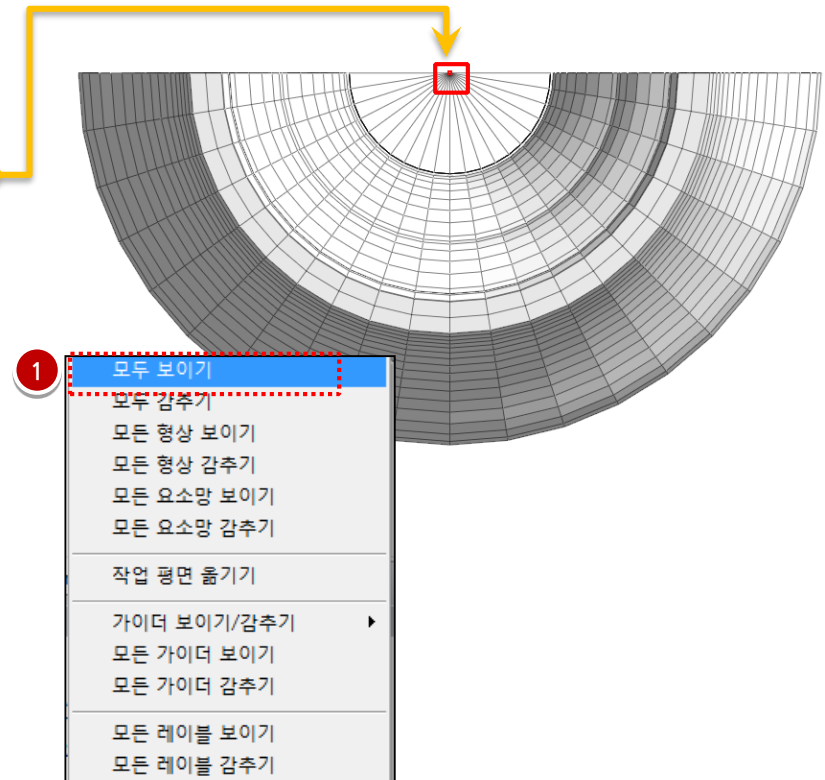
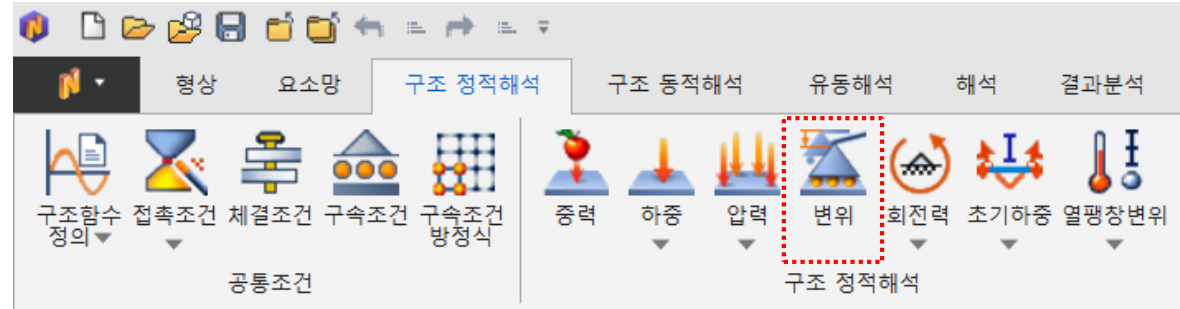
1. 작업평면에서 오른쪽 마우스 클릭 후
“모두 보이기” 클릭

2. 강제변위 입력

이름	Rigid
대상종류	절점
대상선택	1개 선택(그림참조)
하중(Z-축)	0.42 (rad) (약 24°)
하중세트	회전

3. [확인] 버튼 클릭.

강제변위-회전각의 단위는 [rad] 입니다.





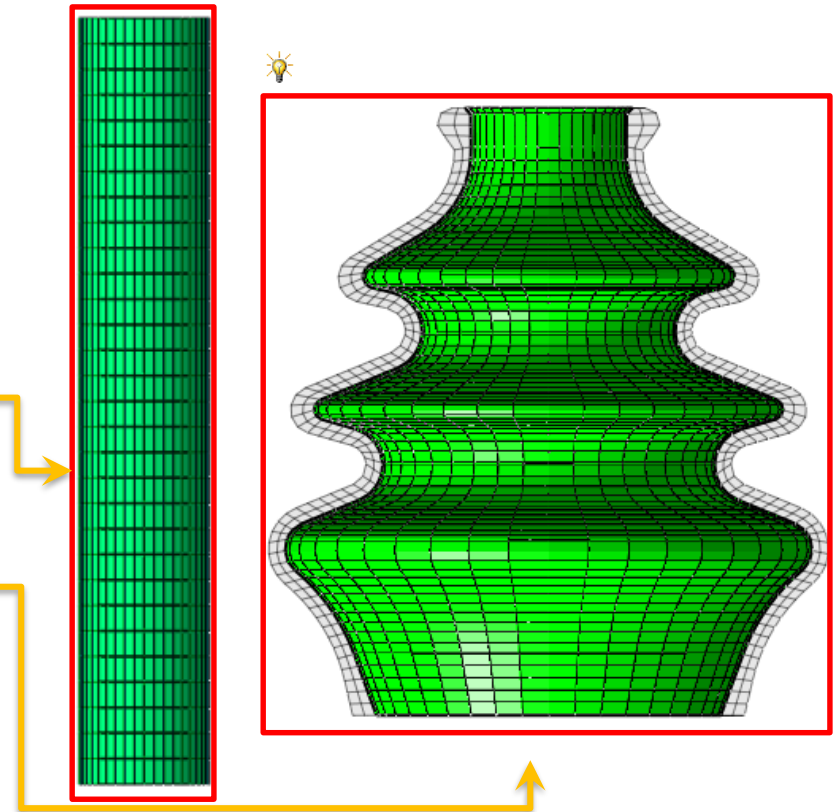
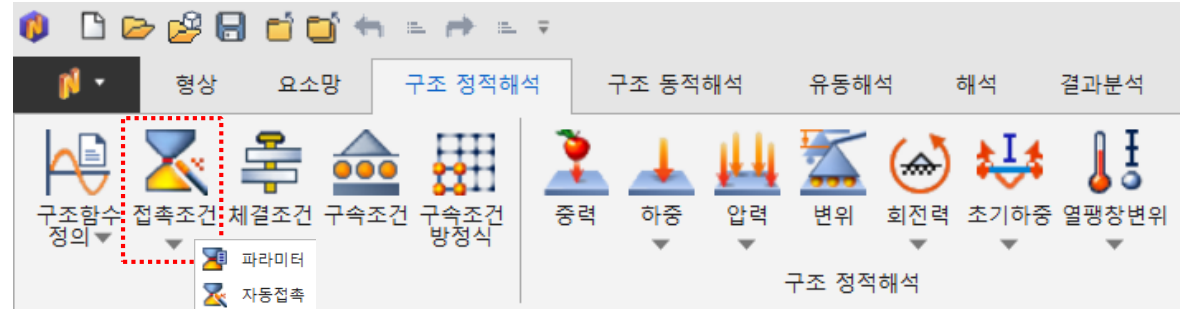
작업순서

1. 수동접촉 설정

이름	접촉
접촉방법	점-면 접촉
접촉종류	일반접촉
주접촉면	2D 요소 600개 선택 (그림참조)
종속접촉면	3D 요소면 1640개 선택 (그림참조)

3. [확인] 버튼 클릭.

 Rubber의 안쪽 요소면을 잡을때, [] (앞면선택)을 활성화 하신 후, 대상을 선택하시면 보다 쉽게 선택할 수 있습니다.

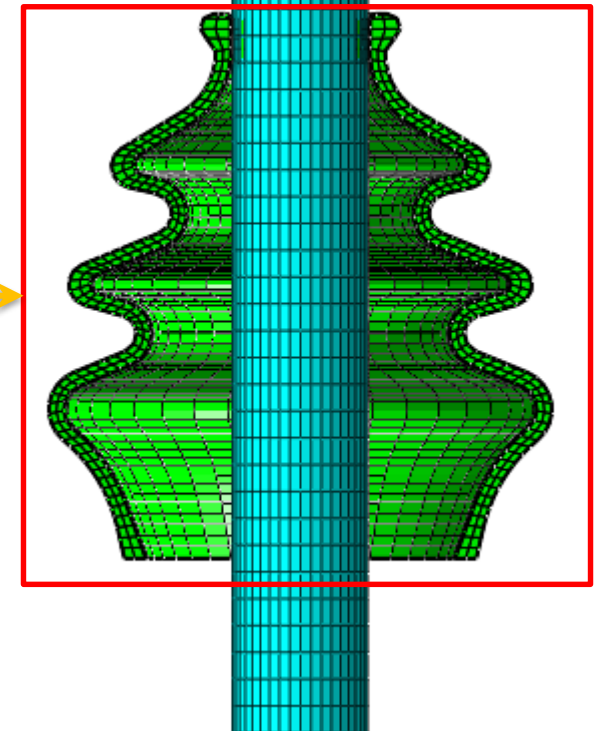
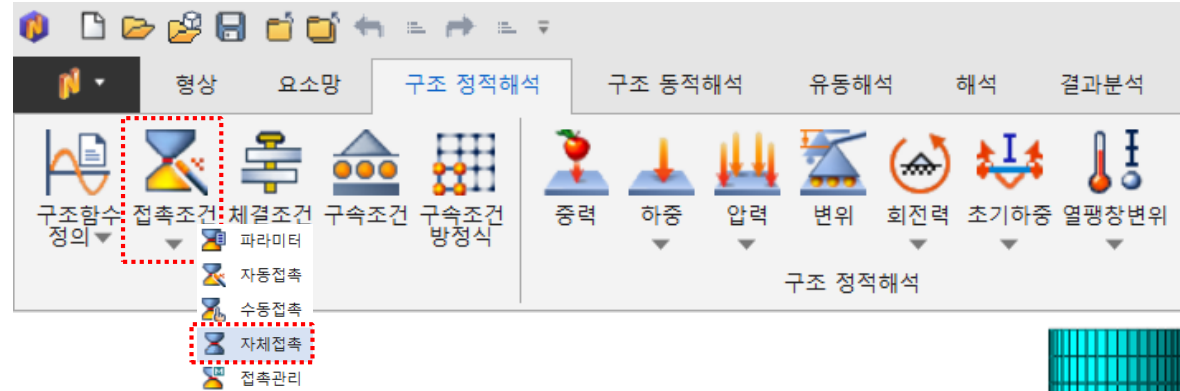


작업순서

1. 수동접촉 설정

이름	자체접촉
접촉방법	자체 접촉
접촉종류	일반 접촉
대상종류	요소망세트
대상선택	1개 대상 선택 (그림참조)

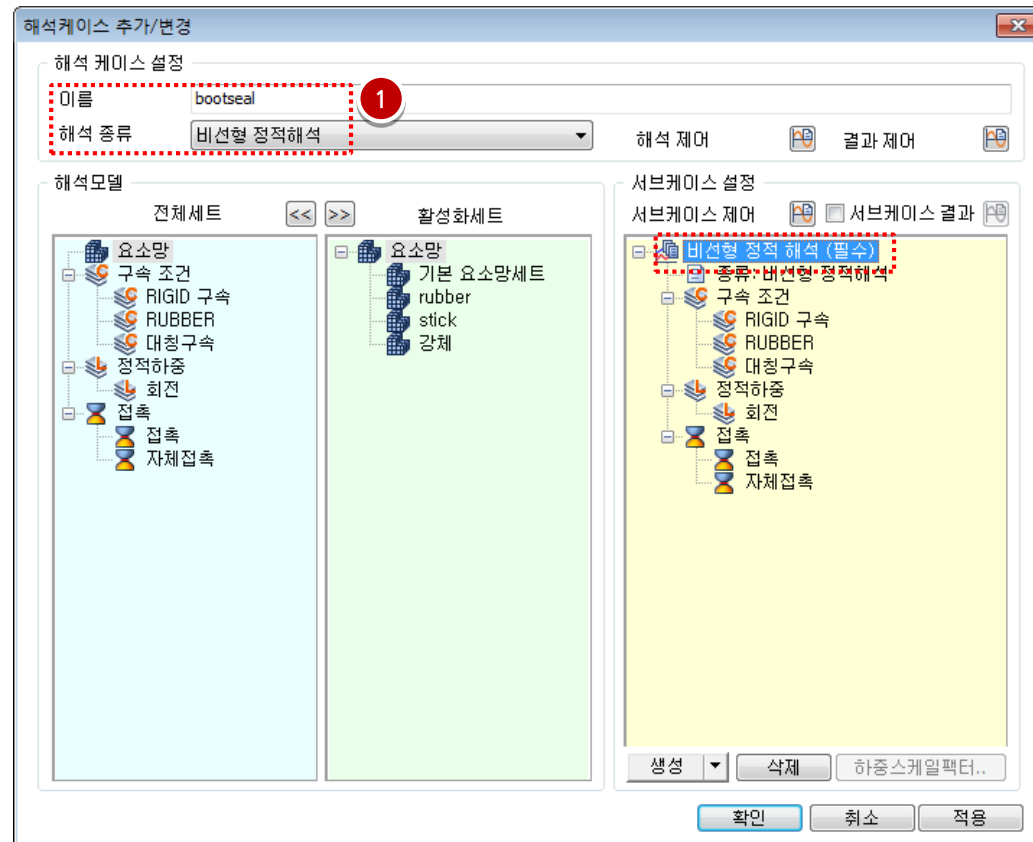
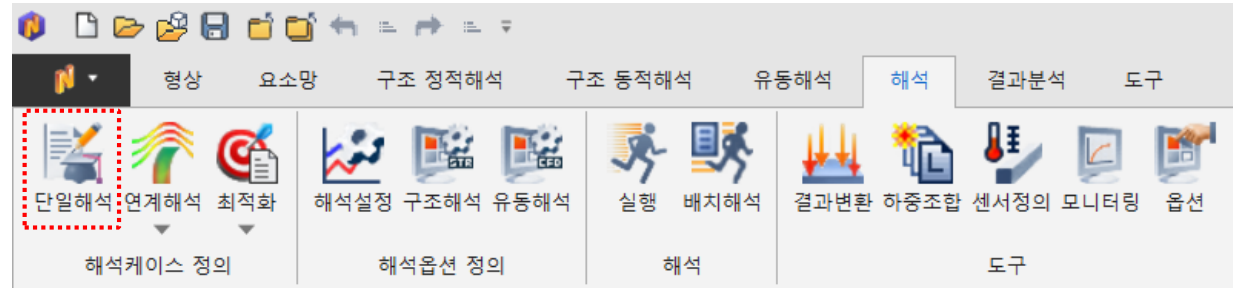
2. [확인] 버튼 클릭.




작업순서

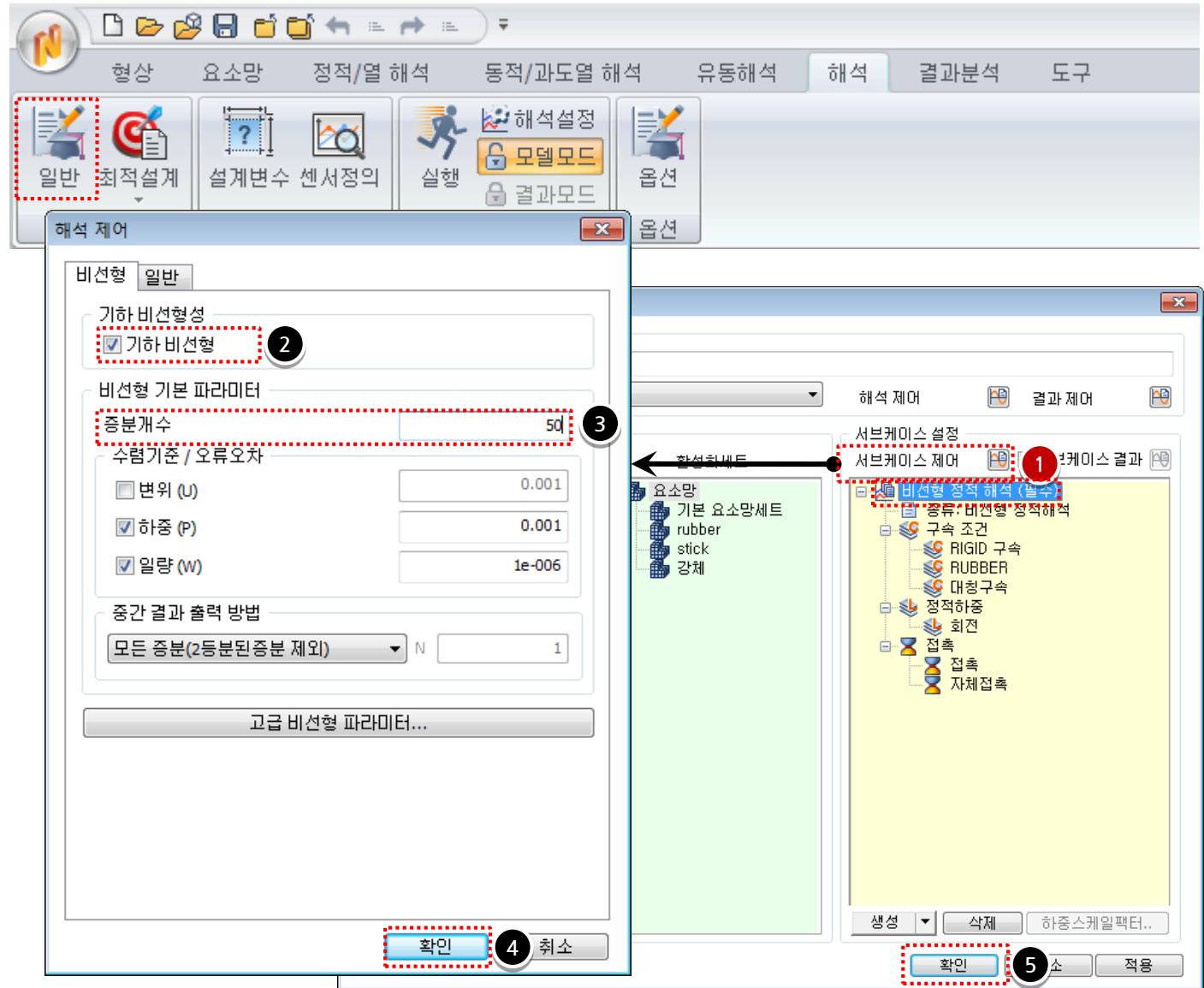
1. 이름: "Bootseal" 입력.

해석 종류: [비선형 정적해석] 선택.



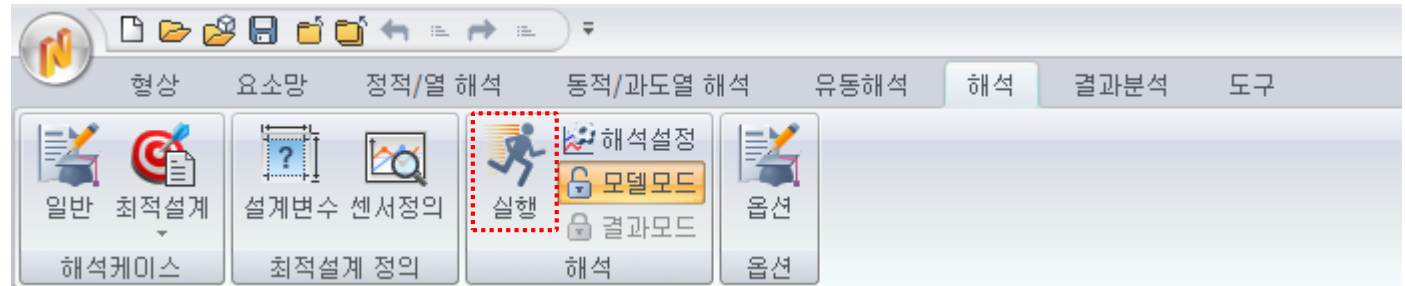
작업순서

1. “bootseal” 선택 후, 서브케이스 제어
[] 클릭.
2. “기하비선형” 체크
3. 증분개수 : “50” 입력
4. [확인] 버튼 클릭.
5. [확인] 버튼 클릭.

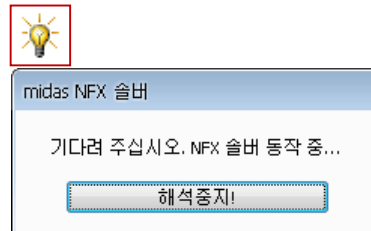


작업순서

1. [확인] 버튼 클릭.



💡 해석을 실행하면 midas NFX 슬버가 작동됩니다. [해석중지!] 버튼을 클릭하면 해석이 중지됩니다.



작업순서

1. 해석 및 결과 작업트리에서 전체 범위

더블 클릭.

2. 해석 및 결과 >> 일반 >> 실제스케일

변경

3. [] (멀티-스텝 애니메이션 녹화) 클릭.



4. [] (oooooooo) 클릭.

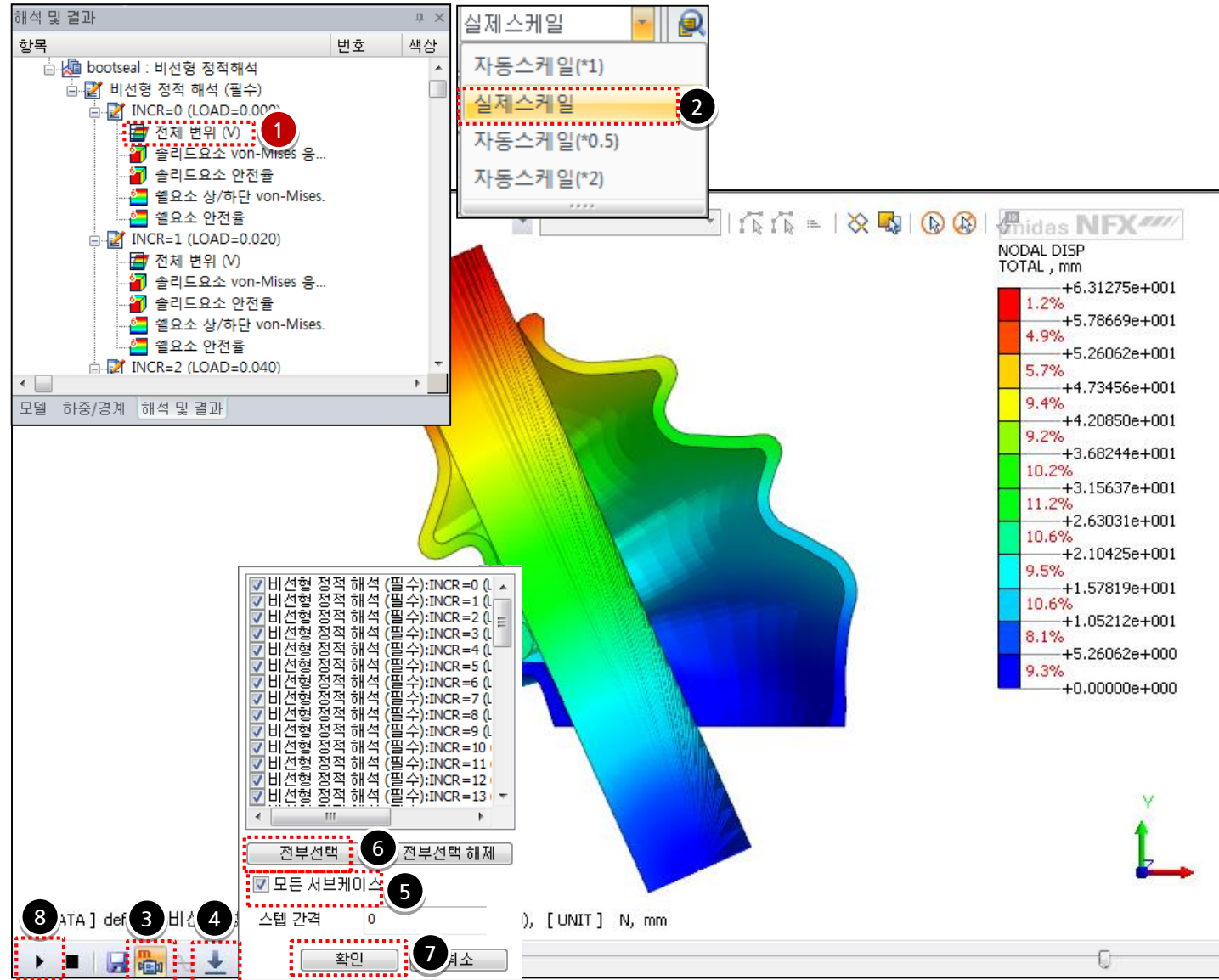
5. “모든 서브케이스” 체크

6. 전부선택 클릭

7. [확인] 버튼 클릭

8. [] (재생) 클릭.

 멀티-스텝 애니메이션 녹화를 이용하면 스텝별 결과를 애니메이션으로 확인할 수 있습니다. (자동으로 전체 스텝 결과에 체크되어 있습니다.) 애니메이션 결과 확인이 끝나면 [] 버튼을 클릭하여 애니메이션 재생을 종료해 주어야 합니다. 이는 다른 후처리 작업시 발생할 수 있는 조작의 불편함을 최소화하기 위한 작업입니다.



해석 및 결과

- bootseal : 비선형 정적해석
 - 비선형 정적 해석 (필수)
 - INCR=0 (LOAD=0.000)
 - 전체 범위 (V) **1**
 - 솔리드요소 von-Mises 응...
 - 솔리드요소 안전율
 - 셀요소 상/하단 von-Mises.
 - 셀요소 안전율
 - INCR=1 (LOAD=0.020)
 - 전체 범위 (V)
 - 솔리드요소 von-Mises 응...
 - 솔리드요소 안전율
 - 셀요소 상/하단 von-Mises.
 - 셀요소 안전율
 - INCR=2 (LOAD=0.040)

실제스케일

- 자동스케일(*1)
- 실제스케일 **2**
- 자동스케일(*0.5)
- 자동스케일(*2)

NODAL DISP TOTAL, mm

1.2%	+6.31275e+001
4.9%	+5.78669e+001
5.7%	+5.26062e+001
9.4%	+4.73456e+001
9.2%	+4.20850e+001
10.2%	+3.68244e+001
11.2%	+3.15637e+001
10.6%	+2.63031e+001
9.5%	+2.10425e+001
10.6%	+1.57819e+001
8.1%	+1.05212e+001
9.3%	+5.26062e+000
	+0.00000e+000

비선형 정적 해석(필수): INCR=0 (LOAD=0.000)

- 비선형 정적 해석(필수): INCR=0 (LOAD=0.000)
- 비선형 정적 해석(필수): INCR=1 (LOAD=0.020)
- 비선형 정적 해석(필수): INCR=2 (LOAD=0.040)
- 비선형 정적 해석(필수): INCR=3 (LOAD=0.060)
- 비선형 정적 해석(필수): INCR=4 (LOAD=0.080)
- 비선형 정적 해석(필수): INCR=5 (LOAD=0.100)
- 비선형 정적 해석(필수): INCR=6 (LOAD=0.120)
- 비선형 정적 해석(필수): INCR=7 (LOAD=0.140)
- 비선형 정적 해석(필수): INCR=8 (LOAD=0.160)
- 비선형 정적 해석(필수): INCR=9 (LOAD=0.180)
- 비선형 정적 해석(필수): INCR=10 (LOAD=0.200)
- 비선형 정적 해석(필수): INCR=11 (LOAD=0.220)
- 비선형 정적 해석(필수): INCR=12 (LOAD=0.240)
- 비선형 정적 해석(필수): INCR=13 (LOAD=0.260)

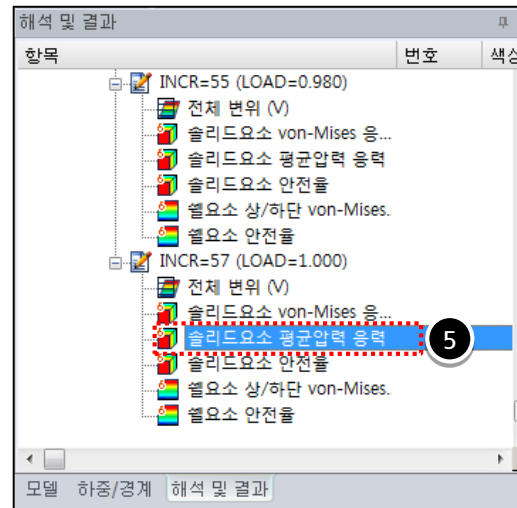
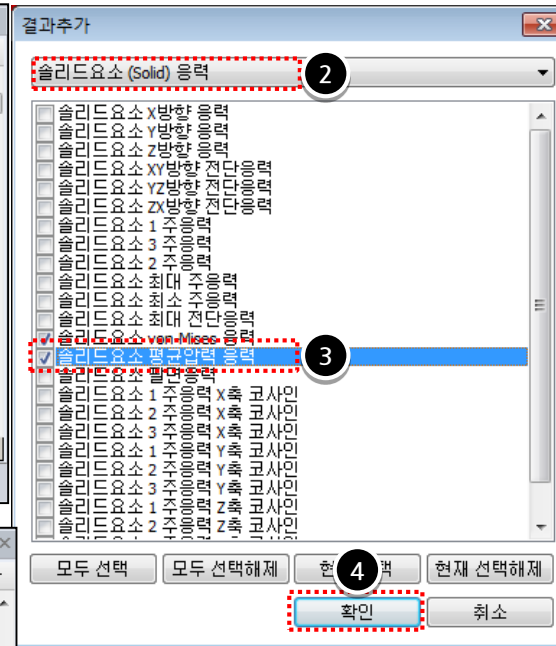
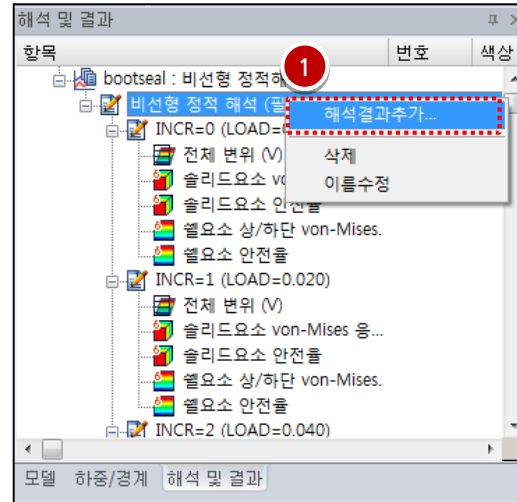
전부선택 **6** **전부선택 해제**

모든 서브케이스 **5**

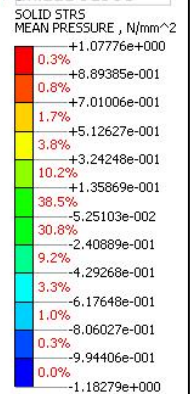
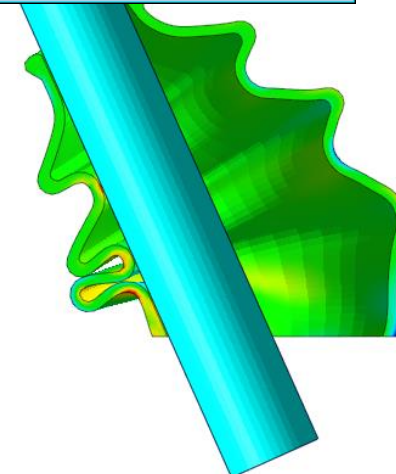
8 [ATA] def **3** 비선 **4** 스텝 간격 0 **7** [확인] **8** [재생]

작업순서

1. 해석 및 결과 작업트리에서 비선형정적 해석(필수) 우클릭 후, [해석결과추가..] 클릭.
2. [솔리드요소 (Solid)응력] 선택
3. 솔리드요소 평균압력 응력 체크
4. [확인] 버튼 클릭.
5. INCR=57 (LOAD=1.000) >> [솔리드요소 평균압력 응력] 더블 클릭



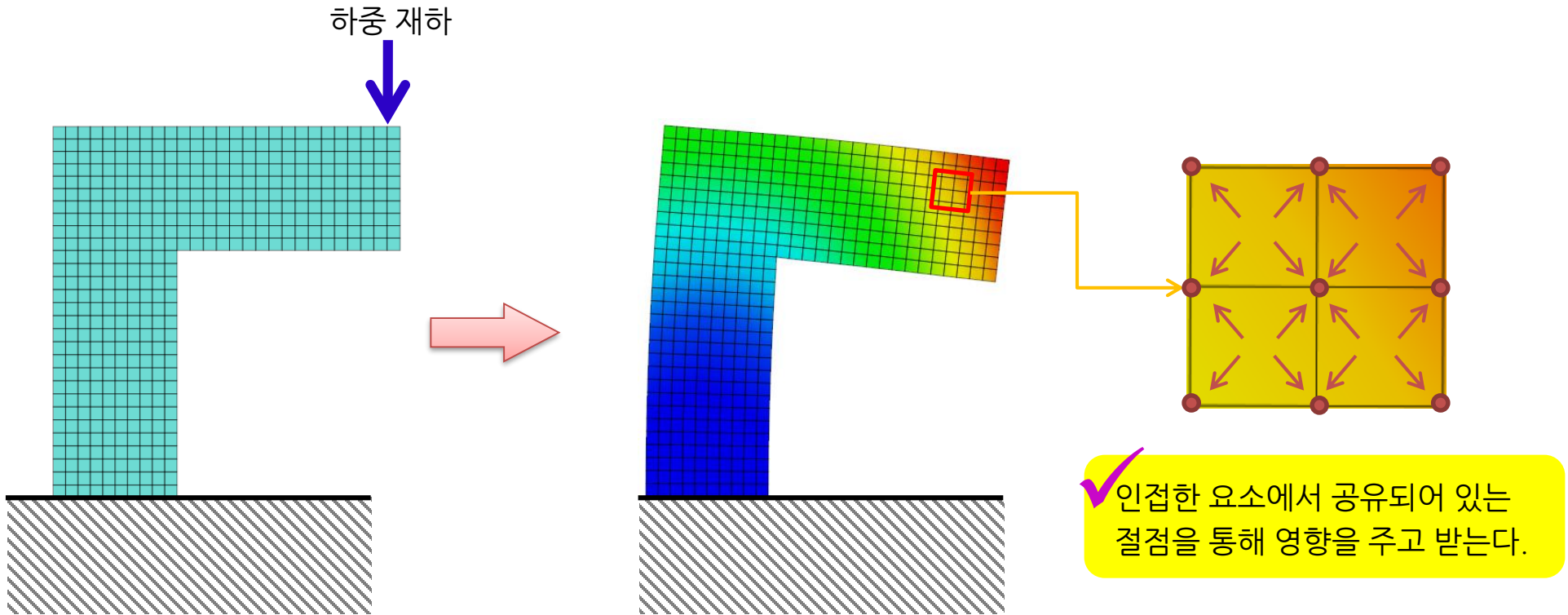
💡 초탄성 재료의 응력결과는 von-mises 응력이 아닌 평균압력 응력을 확인해야 합니다.



[DATA] default, 비선형 정적해석 (필수), INCR=53 (LOAD=1.000), [UNIT] N, mm

접촉비선형

접촉이 필요한 이유는?

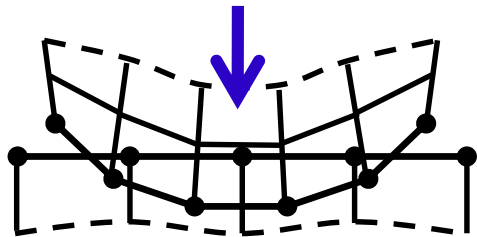
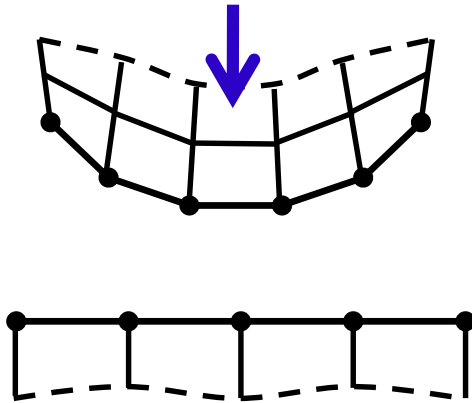


즉, 절점이 공유되어 있지 않으면 영향을 주고 받지 못한다.
 하지만 실제 모델은 대부분 Body가 2개 이상이므로 절점을 공유시키기 매우 어렵다.

→ 어떻게 해야 하는가?

접촉이 필요한 이유는?

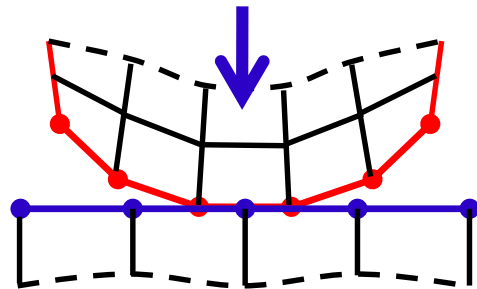
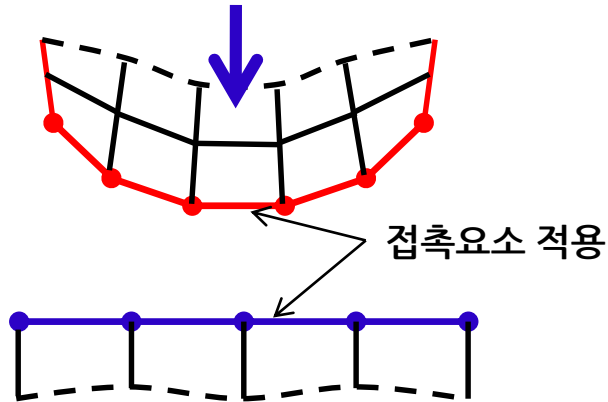
접촉이 없는 경우



요소간 침투 발생

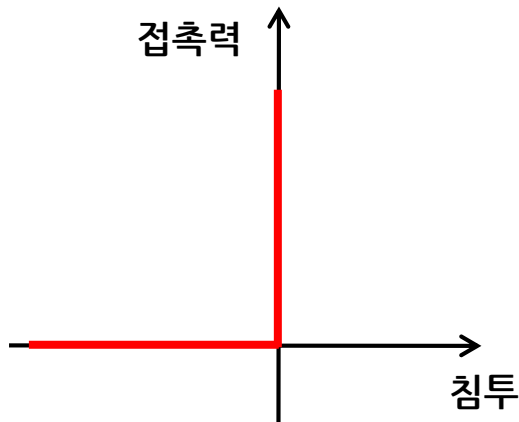
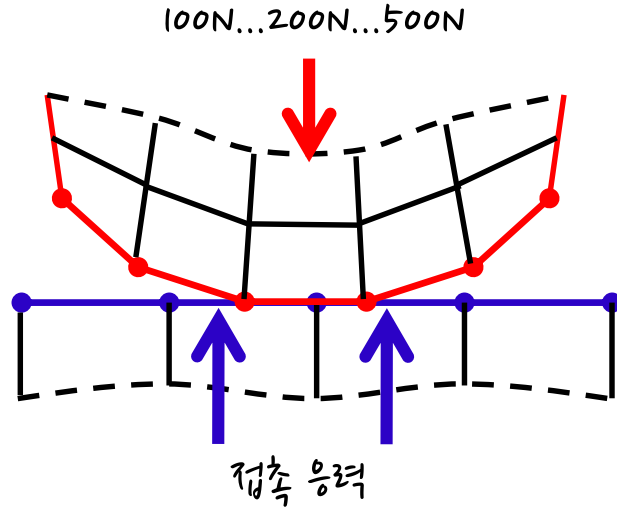
절점이 공유되어 있지 않으므로 서로 인식하지 못함

접촉이 있는 경우



접촉발생

왜 비선형성이 발생하는가?



1. 접촉경계와 접촉응력을 미리 알 수 없다.

- 접촉경계를 찾는 것도 해석 과정의 일부이다.
- 하중의 크기에 따라 닿는 면적이나 접촉응력이 발생하는 정도가 달라지므로, 전체 모델의 [K]값이 비선형적으로 바뀌게 되는 것이다.

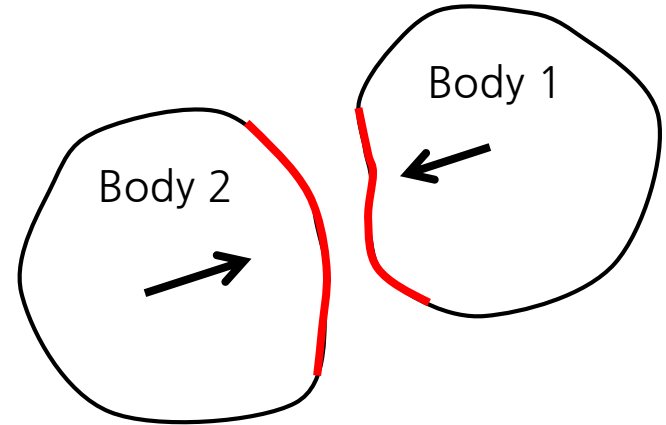
2. 접촉력의 급격한 변화가 발생한다.

- Body가 닿기 전에는 접촉력이 "0" 이지만, 접촉이 일어나는 순간 접촉력이 급격히 커지게 된다.

접촉면 성질에 따른 분류

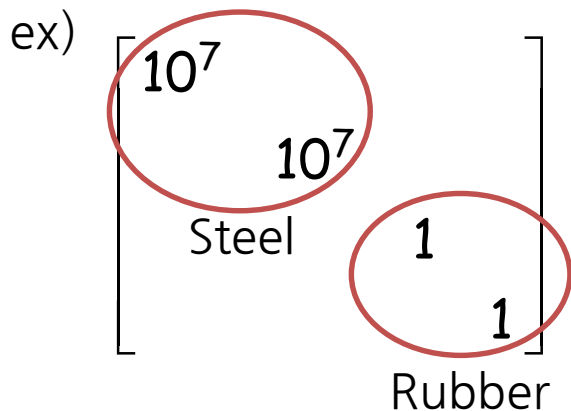
✓ 유연체-유연체 접촉

- Body1 과 Body2는 비슷한 크기의 강성을 갖고, 둘 다 변형할 수 있음
- 가장 일반적인 경우의 접촉이다.



✓ 유연체-강체 접촉

- 한쪽 Body의 강성이 큰 경우 강성이 큰 Body를 강체로 정의 할 수 있음
- 수치적으로 행렬을 계산 못할 수 있다.

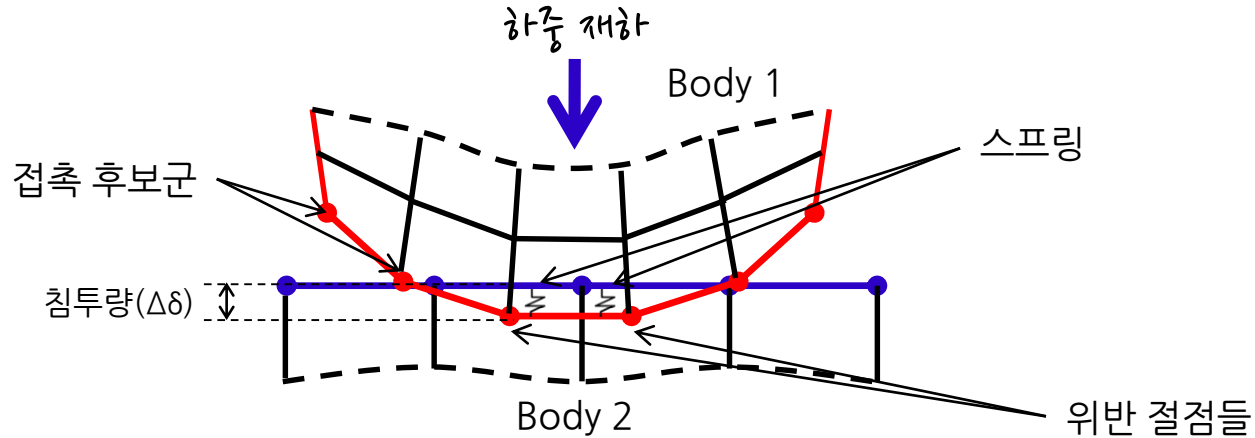


이런 경우 강체로 정의하는 것이 수렴성에 도움이 된다.
Ex) 철(강체)에 접촉하는 고무(유연체)

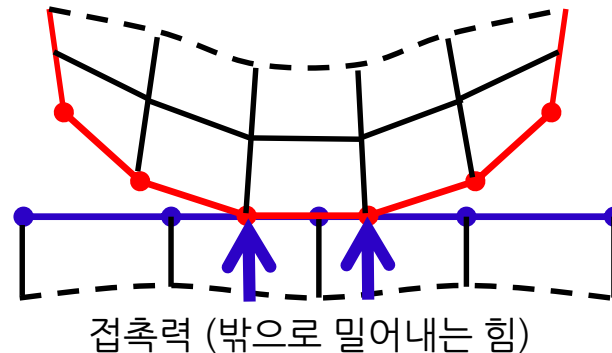
패널티 기법이란?

- 접촉이 발생하는 두 개의 Body 사이에 먼저 미소한 침투량이 발생하게 되고, 침투한 위치에 스프링이 생성된다. 생성된 스프링은 침투한 물체의 침투량에 비례한 접촉력($F=K\Delta\delta$)을 가하여 다시 반대방향으로 밀어내는 것을 말한다. 아래 그림은 접촉이 발생하게 되는 과정이다.

1. 접촉 제한조건을 위반한 절점/세그먼트 탐색



2. 접촉 제한조건을 위반한 절점/세그먼트에 접촉력 재하



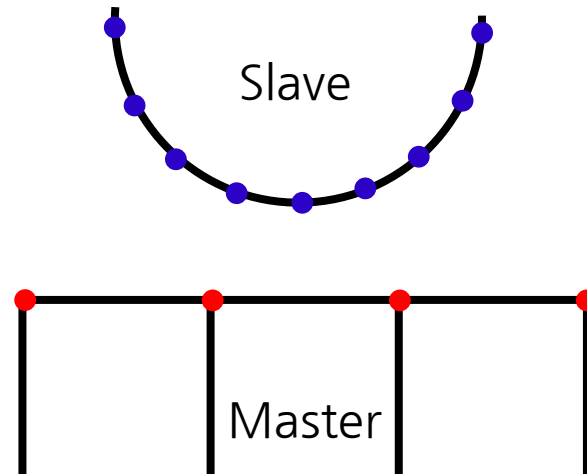
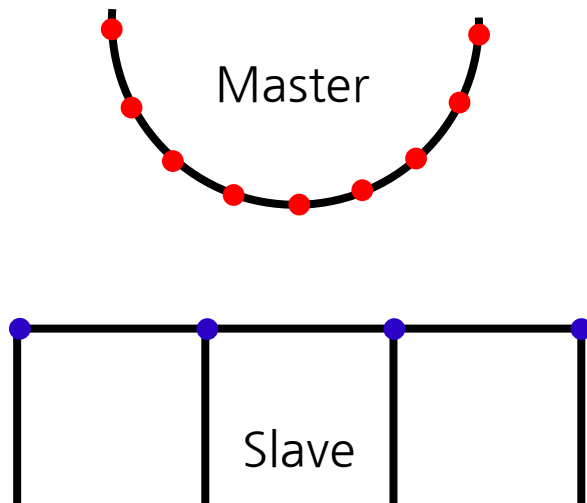
접촉쌍(Contact Pair) - 주 접촉면(Master), 종속절점(Slave)

✓ 접촉 제한조건

종속절점(Slave)은 주 접촉면(Master)을 침투할 수 없음
 주 접촉면(Master)절점은 종속접촉면(Slave)을 침투할 수 있음
 조밀한 요소망에서는 큰 차이가 없지만, 성긴 요소망에서는 결과 차이가 클 수 있음

✓ 주 접촉면(Master)와 종속절점(Slave)의 선택

강체면을 주 접촉면(Master)로 지정
 볼록한(convex) 면을 종속절점(Slave)로 지정
 조밀한 요소망을 종속절점(Slave)로 지정



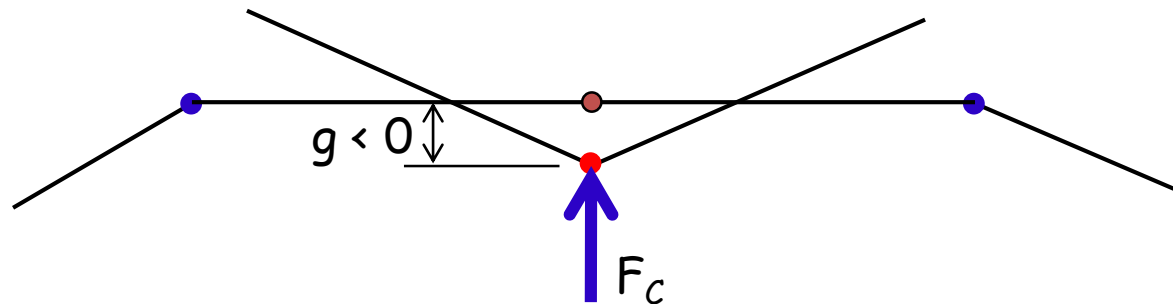
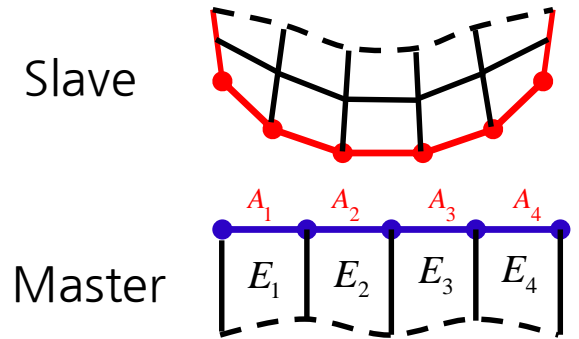
접촉력이란?

- ▶ 침투가 발생 했을 때, 침투한 부분을 밖으로 밀어내게 된다.
이때 발생하는 힘을 접촉력(contact force)이라 한다.
- ▶ 침투량이 클수록 큰 크기의 하중이 요구된다.
- ▶ 접촉력(압축전담 스프링)

$$F_c = K_n \langle -g \rangle$$

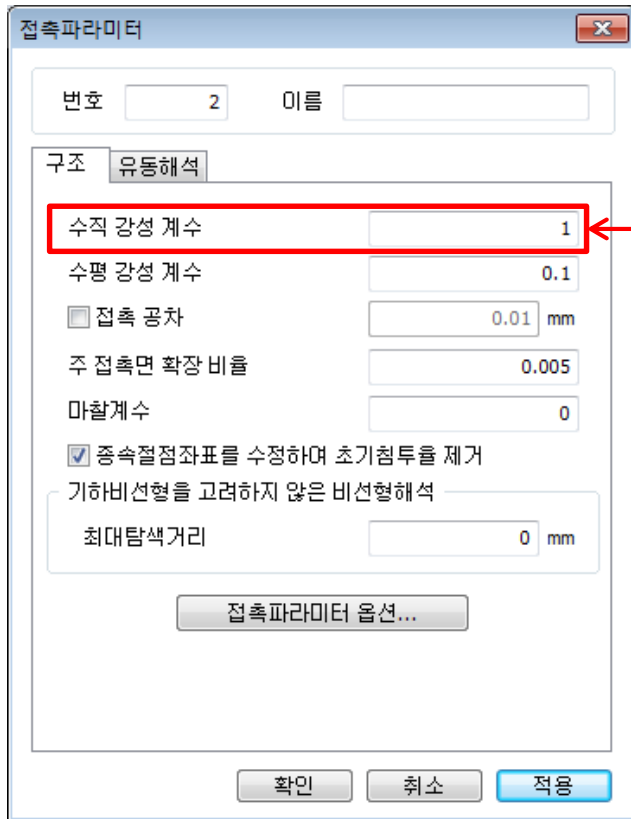
접촉강성(K_n) : 벌칙강성X접촉강성계수

- 벌칙강성은 마스터 요소의 재료의 강성/형상에 종속적이다.
- 탄성계수에, 면적에 비례, 높이에 반비례
- K_n 이 클수록 침투량은 작아진다.



접촉 강성 계수

➤ 재료의 탄성계수에 대한 상수의 곱으로 표현

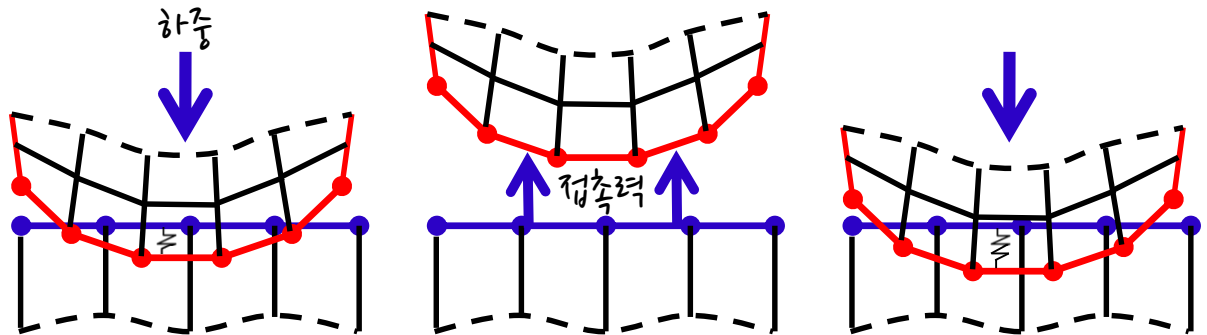


$$K_n = SF \cdot E \quad SF \approx 1.0$$

Master의 탄성계수

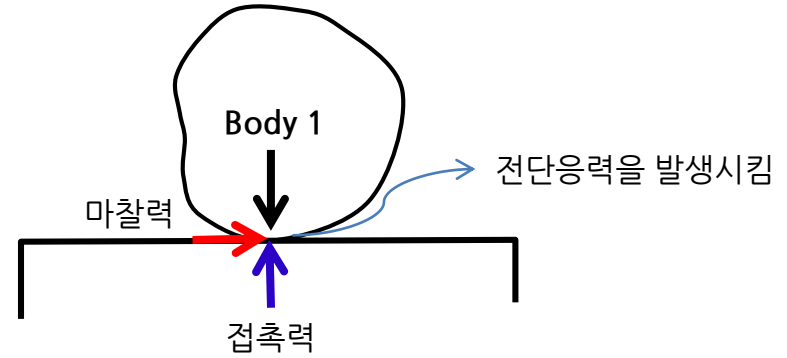
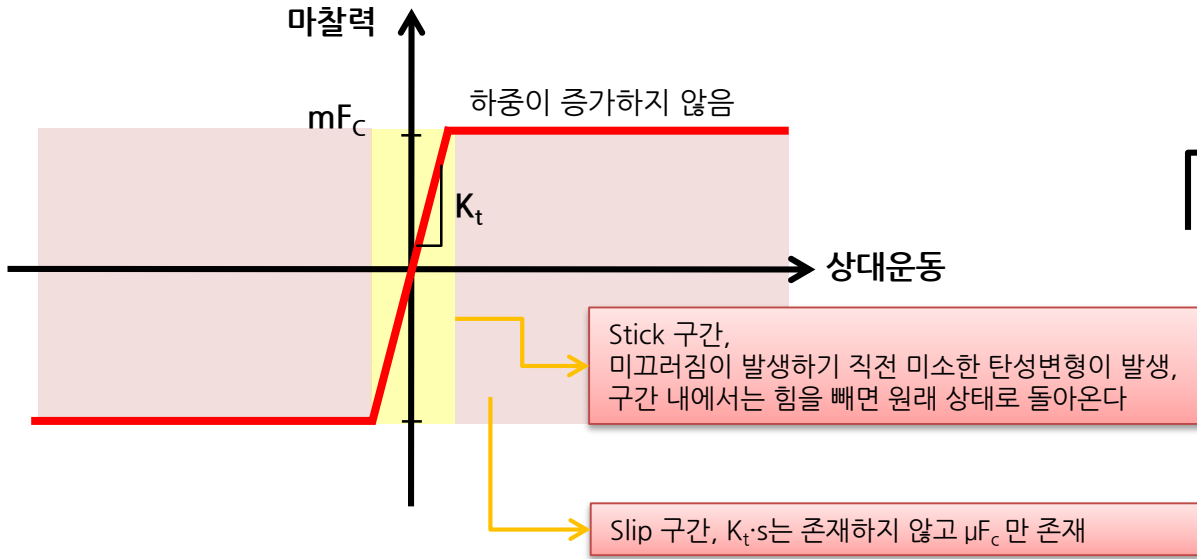
큰 접촉강성이 사용될 수록 해는 정확해진다.

- 큰 접촉강성이 사용되면 침투량은 점점 줄어들기 때문
- 하지만 매우 큰 접촉강성을 사용하게 되면, 모델이 진동하면서 수렴에 문제가 발생한다.



<매우 큰 접촉강성사용시모델이진동하는경우>

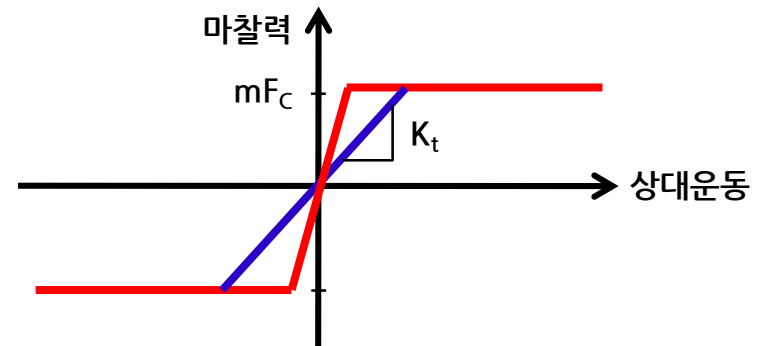
마찰력



$$F_f = K_t s \quad \text{Stick} \quad (K_t: \text{접선강성})$$

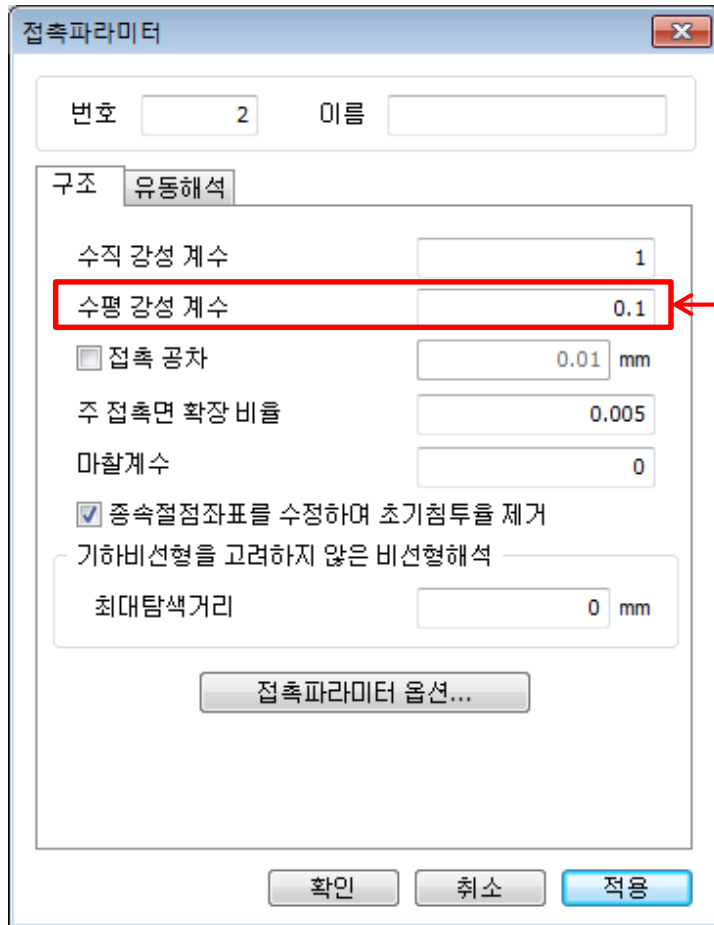
$$= \mu F_c \quad \text{Slip}$$

- 즉, 접선강성은 Stick 상태를 결정
- 재료의 전단강성과 관계됨
- K_t 가 크면 **접촉면은 강체처럼 거동함**
- K_t 가 작으면 **탄성스틱 조건을 지나치게 연장시킴**



수평 강성 계수

→ 재료의 탄성계수에 대한 상수의 곱으로 표현



$$K_t = SF_t \cdot \frac{Kn}{SF_n}$$

수직강성에 종속적

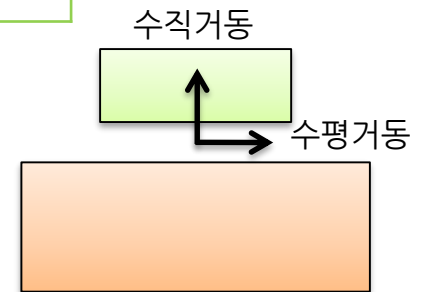
$$SF \approx 0.1$$

접촉 종류



※ 선형접촉은 비선형 해석에서 모두 적용가능 하지만 비선형 접촉은 선형해석에서 사용할 수 없다.

※ 마찰계수를 적용하면 두 면 사이에서 미끄러짐이 발생하기 전에 전단응력을 발생시키게 된다.



접촉 종류

✓ 면-면 접촉

- 주 접촉면과 종속 접촉면의 구분 없이 양방향으로 접촉이 발생하므로 사용자가 따로 주 접촉면과 종속 접촉면을 설정할 필요가 없다.
- 많은 양의 미끄러짐과 마찰력을 고려하는 경우에 적합하다.

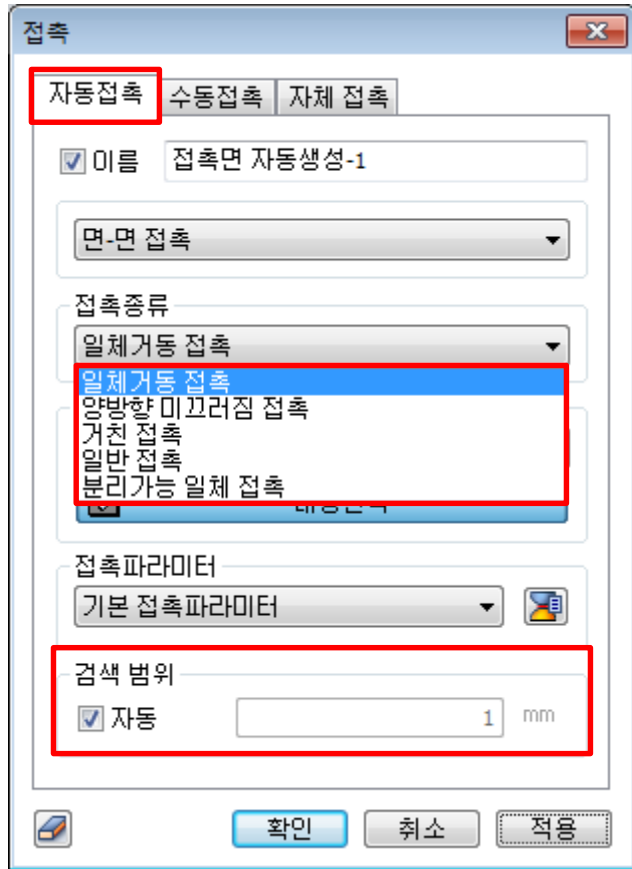
✓ 면-점 접촉

- 종속 접촉면의 절점이 주 접촉면의 면에 접촉이 발생하는 경우이며 면-면 접촉과 달리 종속 접촉면의 절점이 항상 주 접촉면에 침투하게 된다.
- 합리적이지 않은 종속 접촉면과 주 접촉면을 정의하게 되면 수렴이 되지 않거나 잘못된 결과가 도출될 수 있다. 즉, 면-점 접촉에서는 앞에서 정의한 페널티 기법(Penalty Method)의 이론에 근거하여 종속 접촉면과 주 접촉면을 정의 해야 한다.

✓ 페널티 기법에서는...

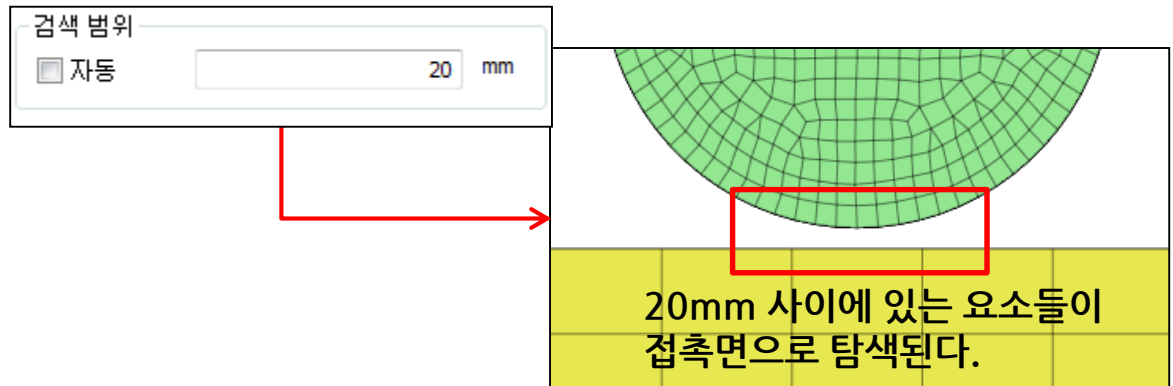
주 접촉면은 평평하거나 강성이 상대적으로 강한 경우 정의하며 볼록하거나 강성이 상대적으로 약하면 종속접촉면으로 설정한다. 또한 조밀한 요소망은 종속 접촉면으로 성긴 요소망을 주 접촉면으로 설정한다.

자동 접촉(Auto Contact)



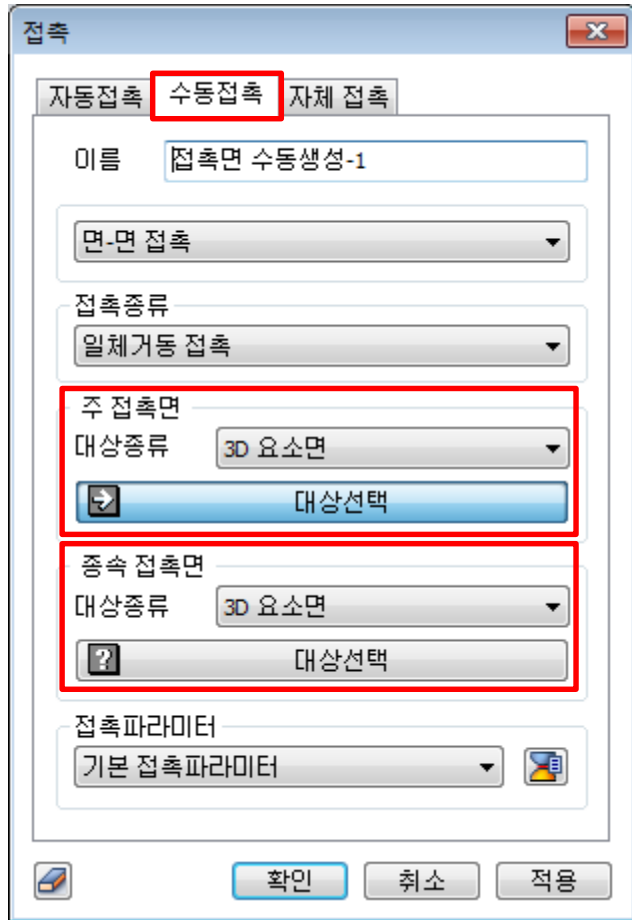
- 검색범위 내에 있는 접촉면들을 탐색하여 접촉을 정의한다.
- 검색범위를 자동으로 설해놓은 경우, 요소망의 크기를 계산하여 자동으로 탐색거리를 산정한다.
- 주 접촉면과 종속 접촉면은 임의로 정해진다.

ex) 검색범위를 20mm로 설정한 경우

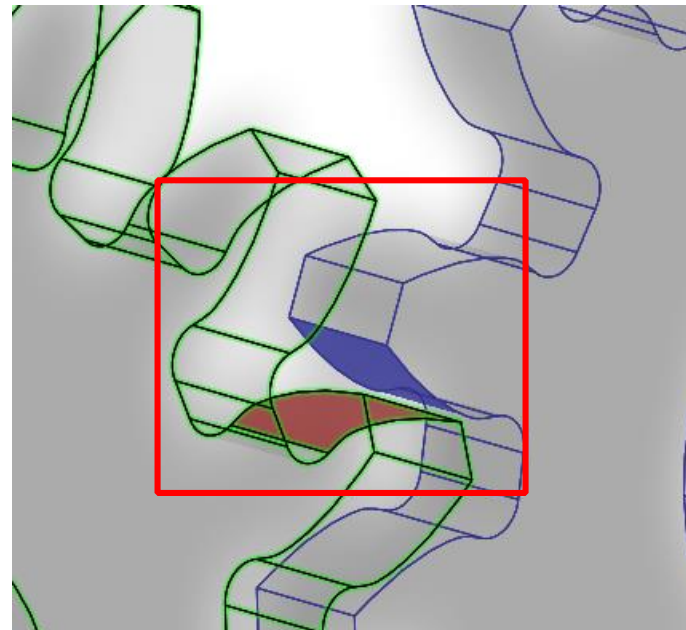


- ✓ 과도하게 큰 검색범위를 사용하면 접촉이 일어나지 않는 부분까지 접촉면으로 탐색되므로 적절한 검색범위를 설정해야 한다.

수동 접촉(Manual Contact)



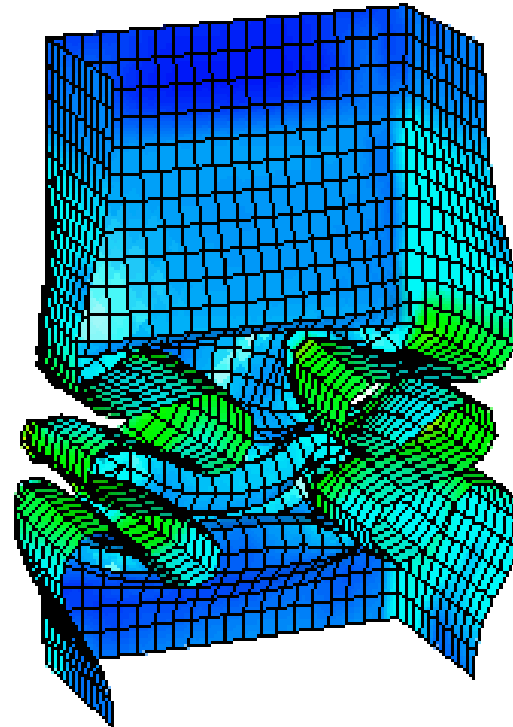
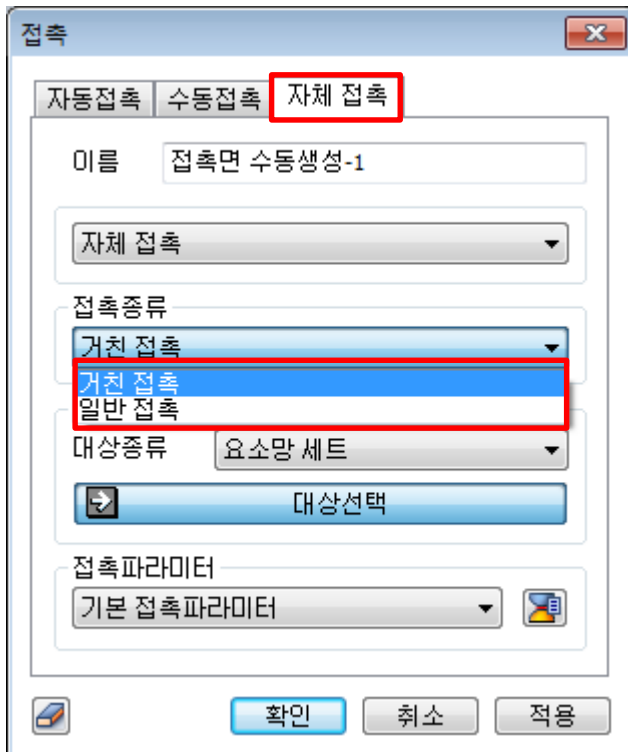
- 주 접촉면과 종속 접촉면을 수동으로 정의한다.
- 접촉이 발생할 것이라고 예상되는 요소만을 선택하여 접촉면을 설정하는 것이 해석시간을 단축시킬 수 있다.



기어 접촉 예상부위

자체 접촉(Self Contact)

- 요소망에서 접촉이 발생한 외부의 면을 모두 접촉면으로 설정한다
- 자체접촉(Self Contact)이 발생하거나 접촉 대상이 많아 접촉면을 예측하기 힘든 경우 효과적으로 사용이 가능하다.



접촉 파라미터

접촉파라미터 [X]

번호 이름

구조 **유동해석**

수직 강성 계수

수평 강성 계수

접촉 공차 mm

주 접촉면 확장 비율

마찰계수

종속절점좌표를 수정하여 초기침투율 제거

기하비선형을 고려하지 않은 비선형해석

최대탐색거리 mm

열전달해석

열전도 W/(mm²·[T])

접촉파라미터 옵션...

→ 접촉공차

접촉탐색거리를 계산하기 위한 계수 값을 입력. (일체거동 접촉, 양방향 미끄러짐 접촉의 경우 주 접촉면과 종속 접촉면이 탐색거리 내에 있는 경우 접촉이 발생. 일반 접촉, 거친 접촉의 경우 변형 중 종속 접촉면이 주 접촉면의 탐색 거리에 도달하게 되면 접촉이 발생)

→ 주 접촉면 확장 비율

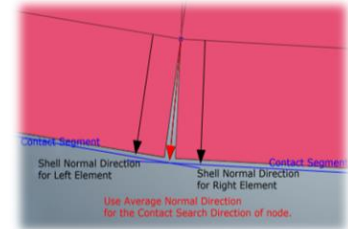
주 접촉면 요소 크기에 곱해진 값 만큼 접촉면을 검색한다. 기본은 0.005이며 접촉 검색범위를 늘리려면 비율 값을 높이면 된다.

→ 종속절점좌표를 수정하여 초기침투율 제거

해석 초기에 종속절점이 주 접촉면을 뚫고 있는 경우에 종속 절점들의 좌표를 옮겨서 주 접촉면상에 놓음으로 초기 침투율을 제거한다. (초기 contact force =0)

→ 기하비선형을 고려하지 않은 비선형해석 - 최대 탐색거리

기하비선형을 고려하지 않은 경우 비선형 구조 해석에서 종속 접촉면을 찾기 위한 주 접촉면으로부터의 탐색 거리이다.



접촉파라미터 옵션 [X]

외연적 비선형 동해석

전역 접촉검색 빈도수

[알림] 자가접촉 기본값:5, 면대면 접촉 기본값:1000

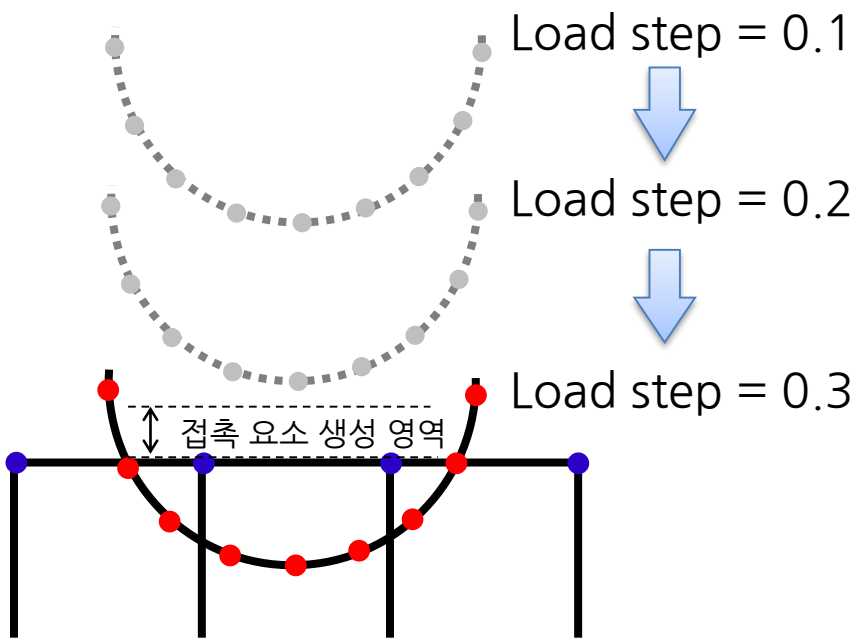
분리가능 일체 접촉

수직 분리 힘 N

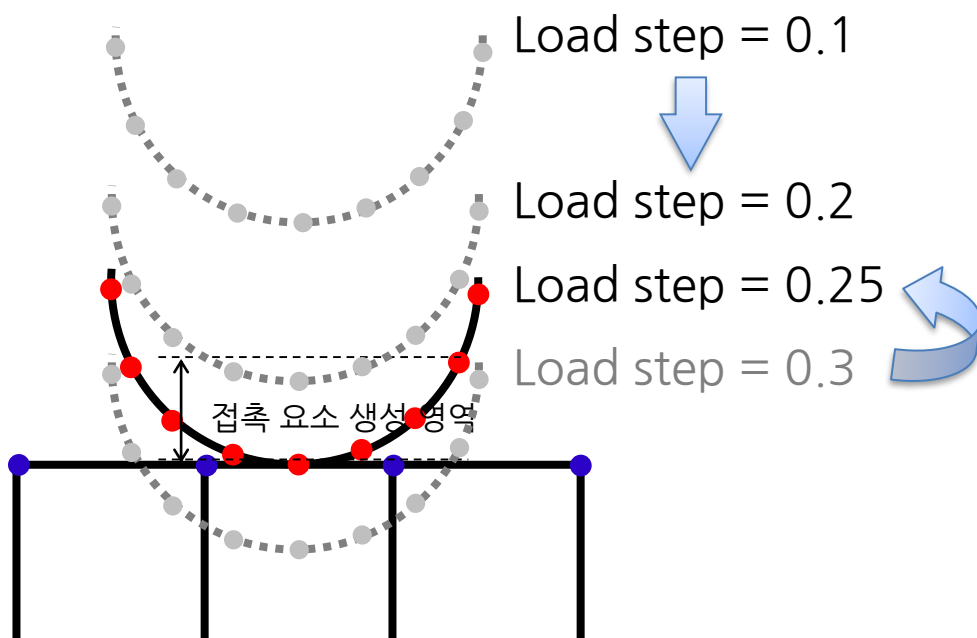
전단 분리 힘 N

- 수직 분리 힘 : 분리가능 일체 접촉을 사용했을 때, 입력한 수직 분리 힘 이상이 될 경우 접촉이 분리 됩니다.
- 수평 분리 힘 : 분리가능 일체 접촉을 사용했을 때, 입력한 수평 분리 힘 이상이 될 경우 접촉이 분리 됩니다.

증분에 따른 접촉탐색



접촉 인식 못하고 그냥 지나감



접촉 인식했지만 침투량이 너무 많아 Bisection
→ 최초의 접촉면 근처로 수렴.

개요

- 선형정적해석

- 단위 : N, mm
- Hertz_contact.nfx

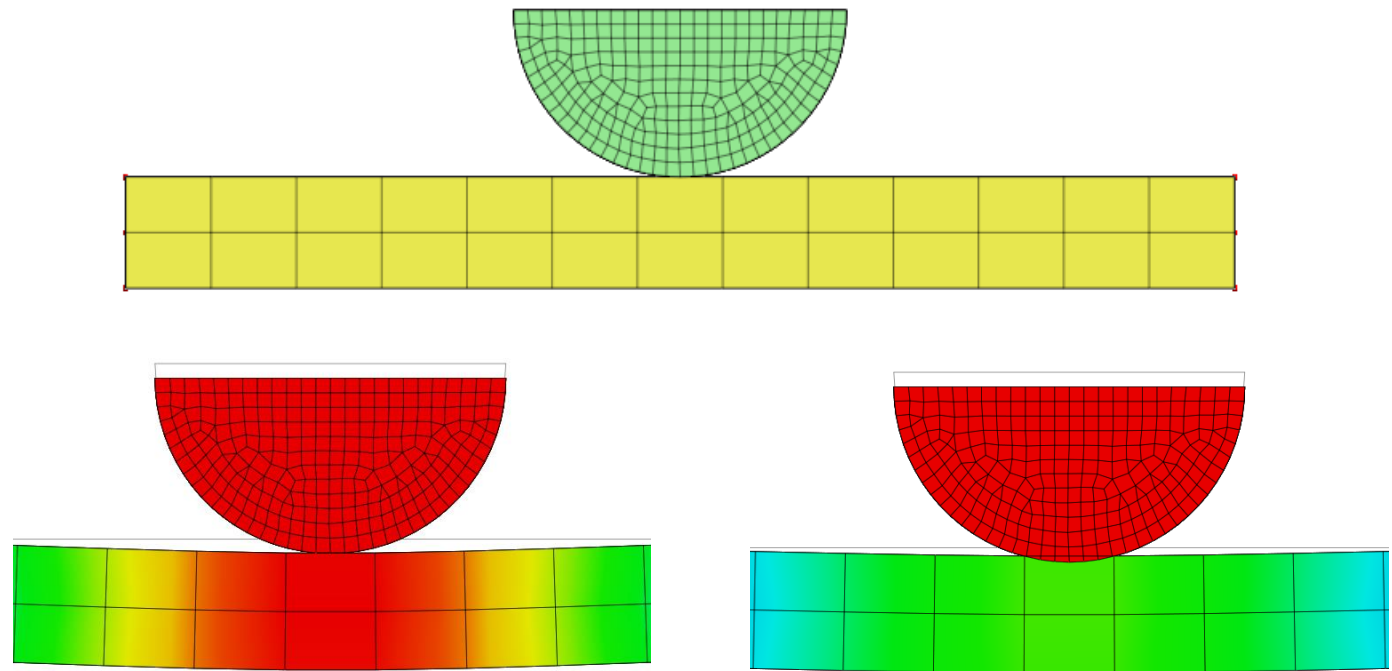
- 경계조건과 하중조건

- 경계조건
- 강제 변위

- 결과확인

- 전체 변위
- 압축응력
- 애니메이션

Hertz Contact



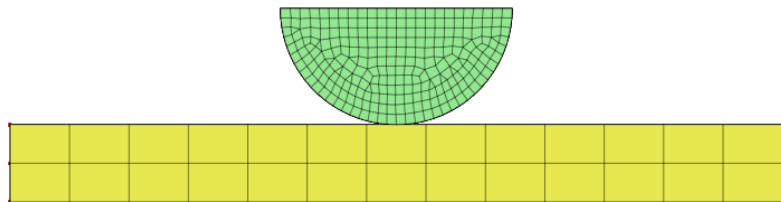
따라하기 목적

접촉 비선형의 이해

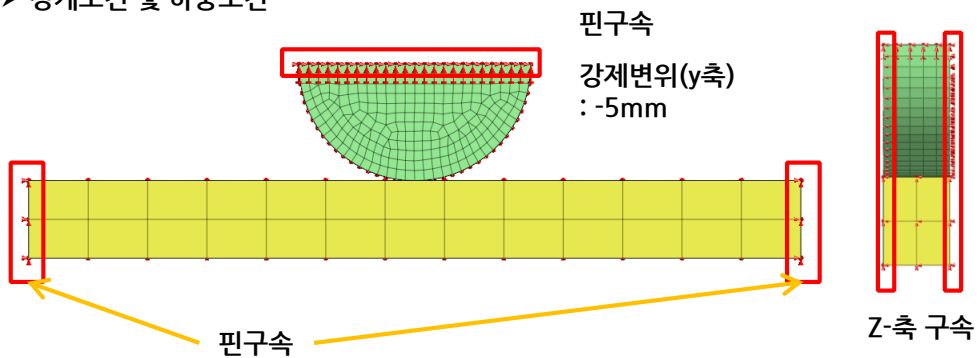
- 접촉 탐색거리 : 검색 범위내에 있는 요소망을 탐색하여 접촉면을 설정합니다.
- 접촉파라미터 - 접촉공차 : 주 접촉면과 종속절집이 공차범위 내에 있는 경우 접촉이 발생한 것으로 계산?판단?합니다.
- 주 접촉면(Master) / 종속절점(Slave)설정 : 상대적으로 강성이 크거나 요소망의 크기가 큰 경우 주 접촉면으로 설정합니다.

해석 개요

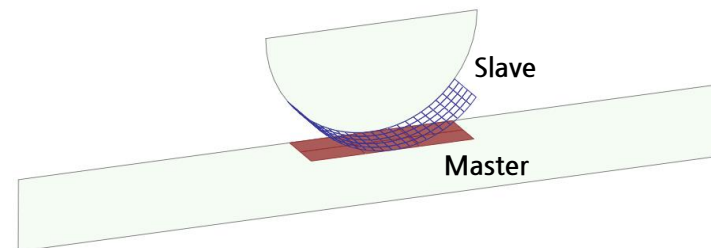
대상 모델



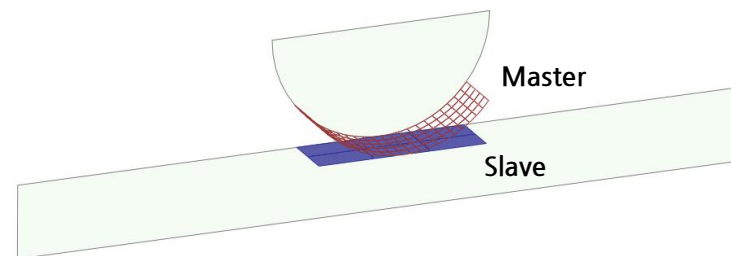
경계조건 및 하중조건



접촉케이스1 : Master/Slave

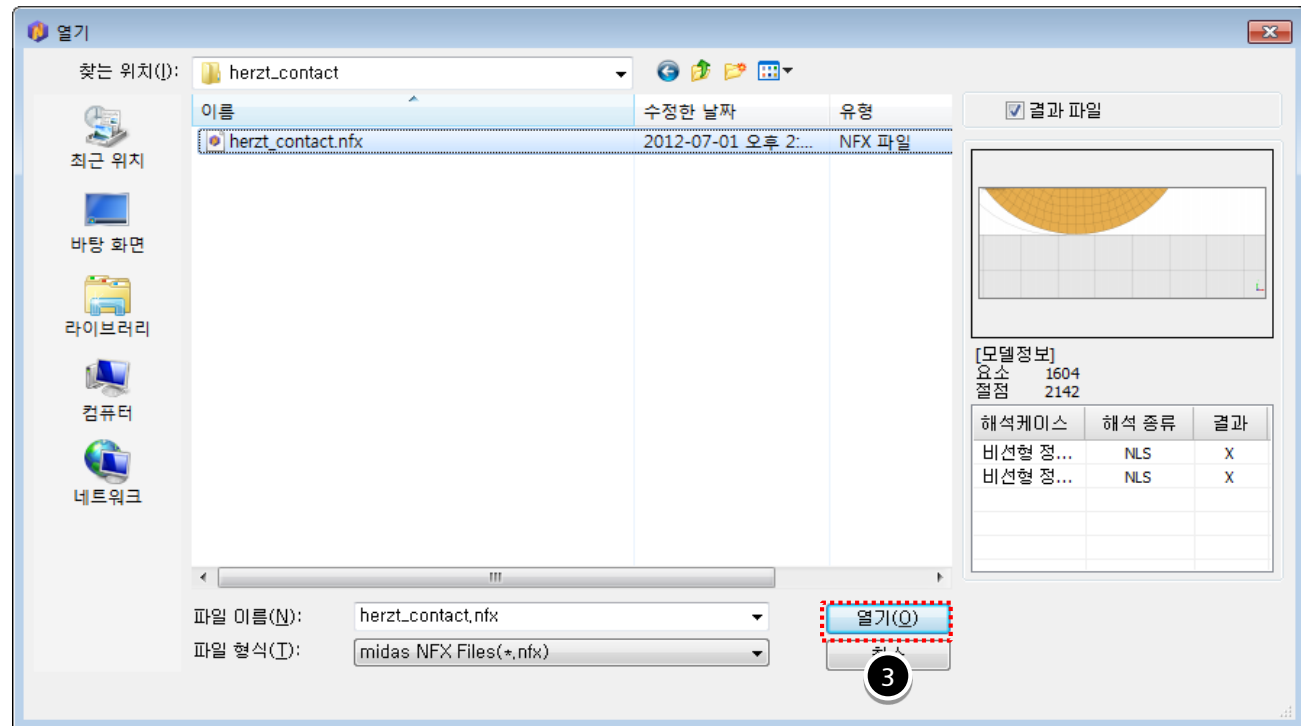
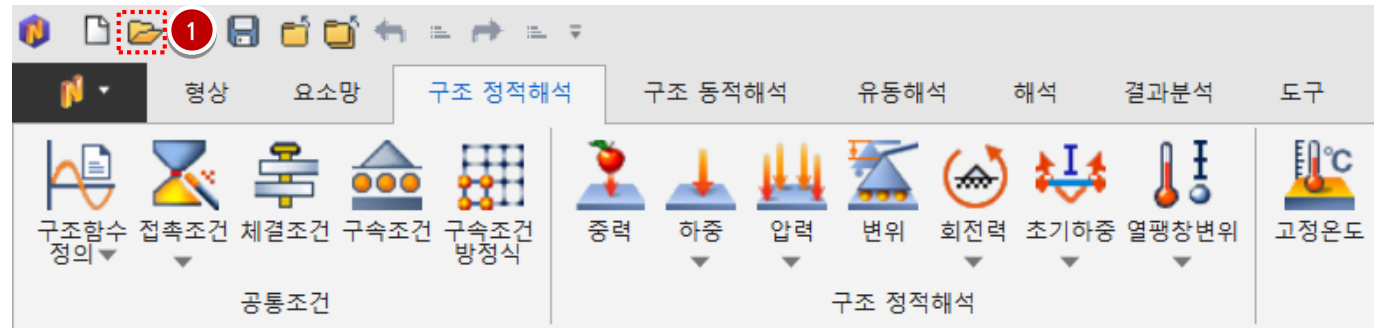


접촉케이스2 : Slave/Master



작업순서

1. [열기] (열기) 클릭.
2. "hertz_contact.nfx" 선택.
3. [열기] 버튼 클릭.

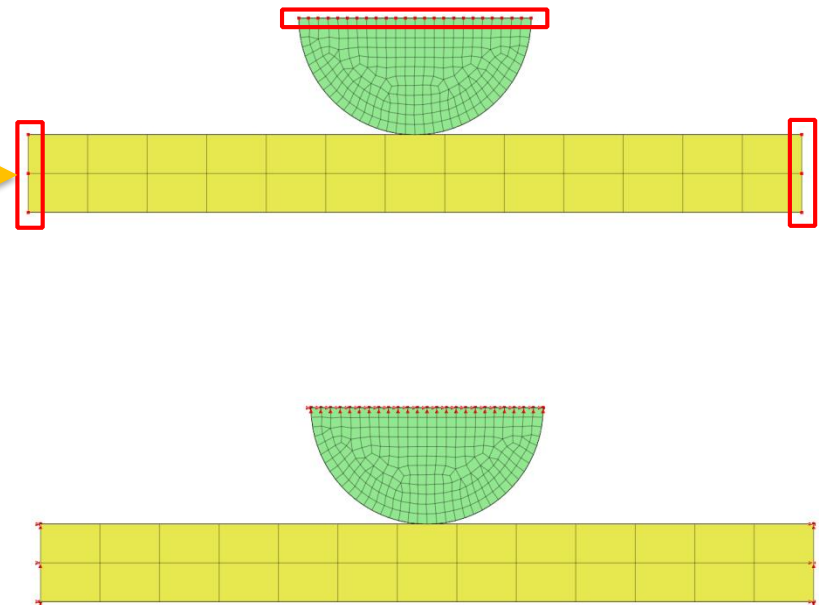
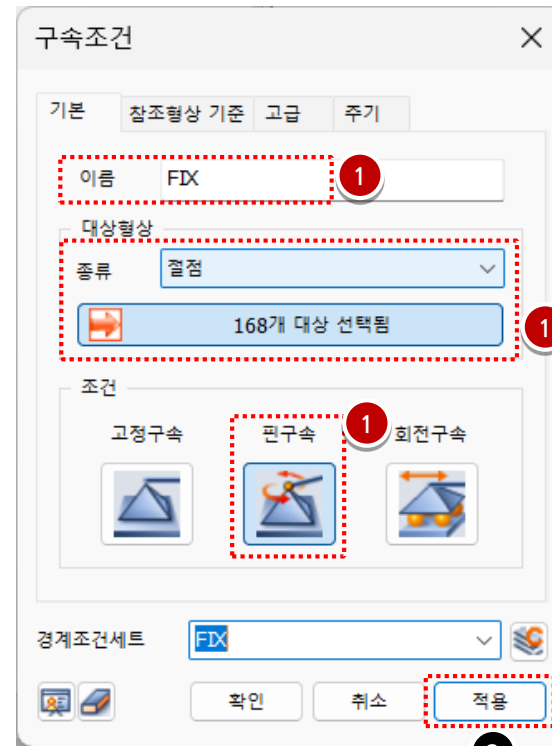
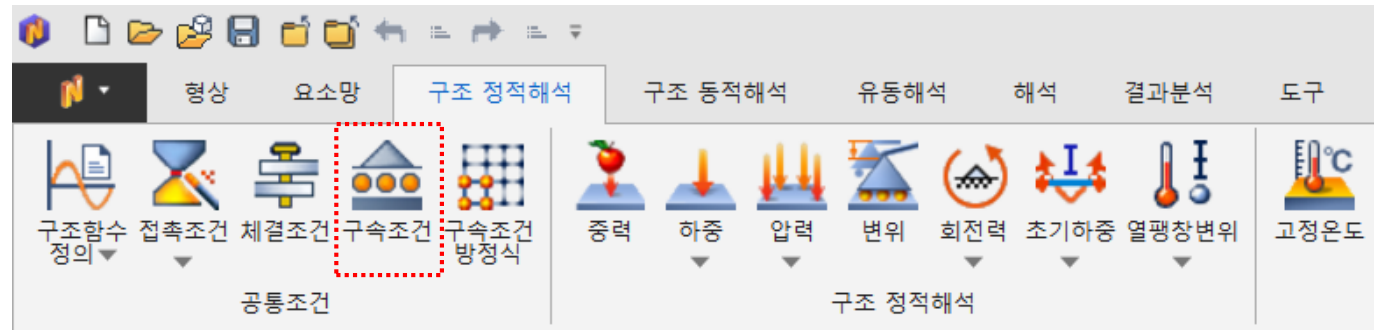


작업순서

1. 구속조건 입력

이름	Rigid
대상종류	절점
대상선택	168개 선택(그림 참조)
조건	고정구속

2. [적용] 버튼 클릭.

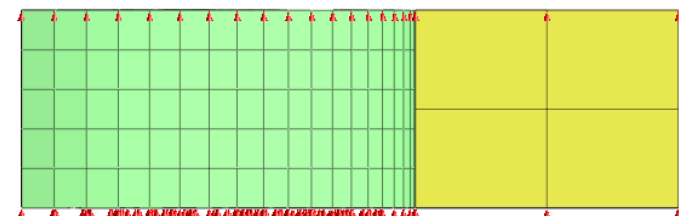
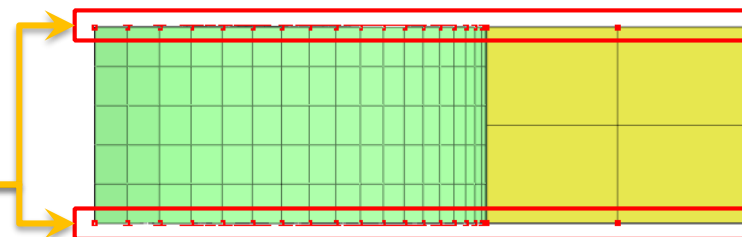
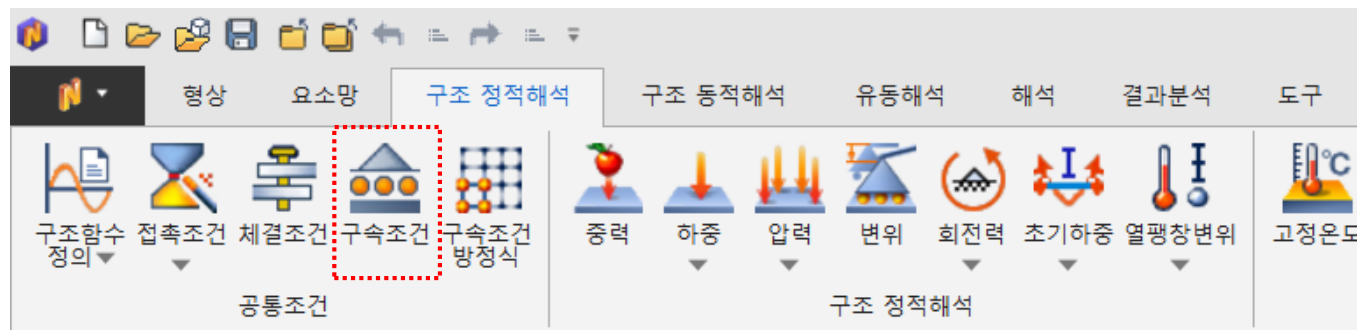


작업순서

1. [] (좌측면 보기) 클릭.
2. [고급] 탭 클릭.
3. 구속조건 입력

이름	대칭구속
대상종류	절점
대상선택	642개 선택 (그림참조)
자유도	Tz

4. [확인] 버튼 클릭.



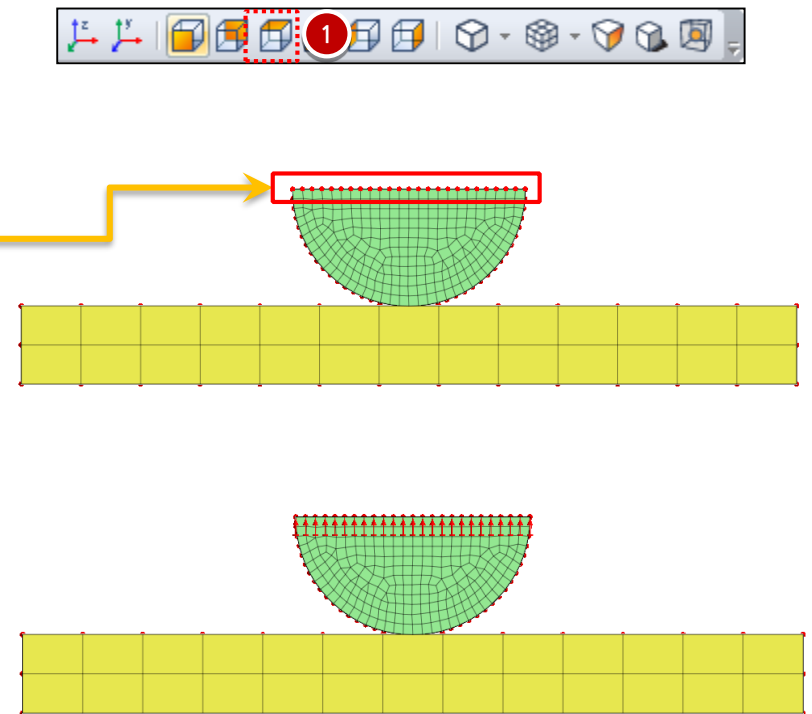
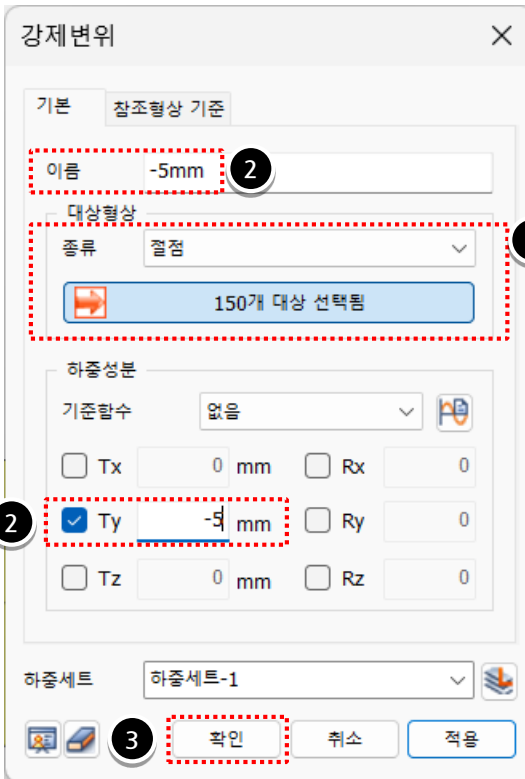
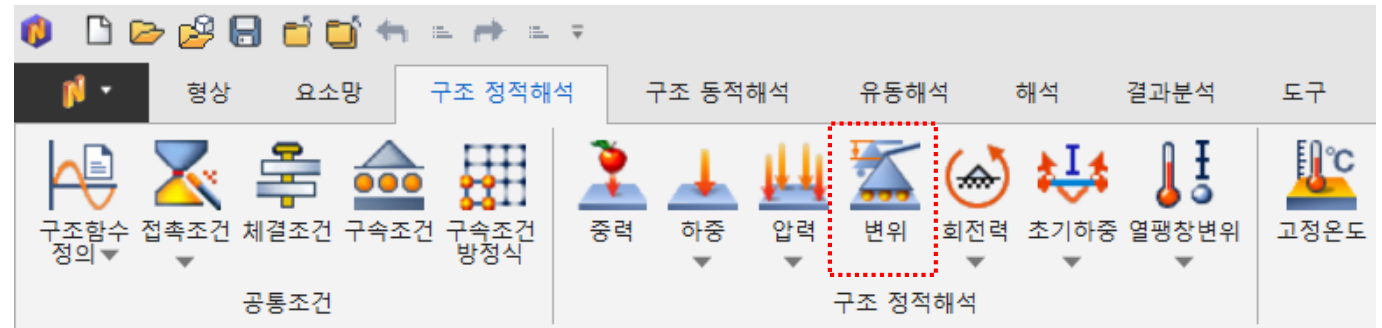
작업순서

1. [] (윗면 보기) 클릭.

2. 강제변위 입력

이름	Rigid
대상종류	절점
대상선택	150개 선택(그림 참조)
하중(Y-축)	-5 mm

3. [확인] 버튼 클릭.

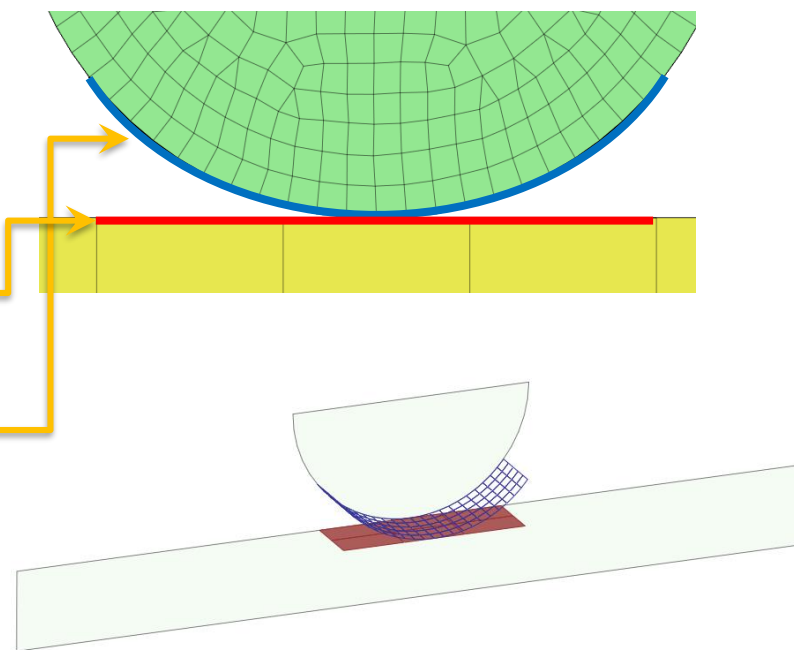
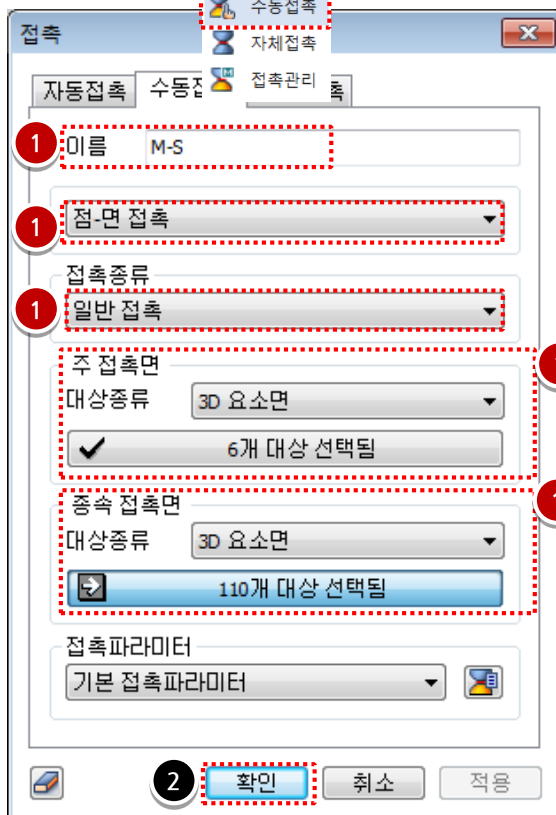
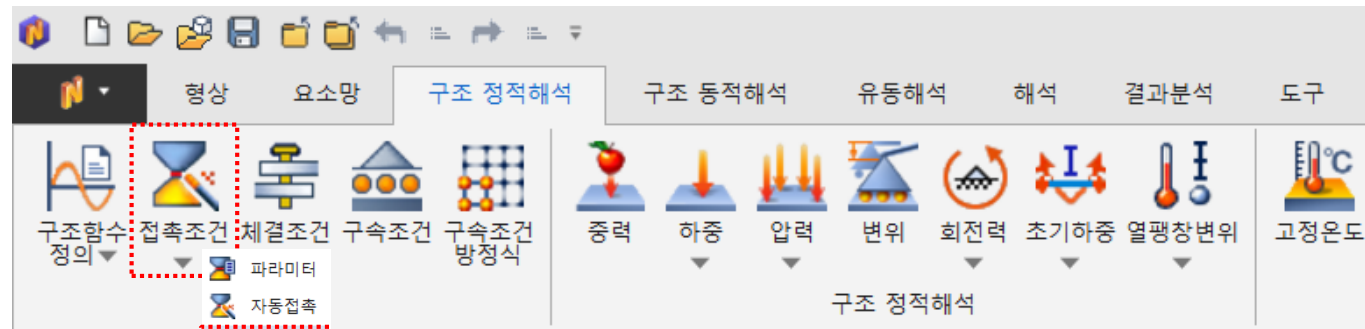


작업순서

1. 수동접촉 설정

이름	M-S
접촉방법	점-면 접촉
접촉종류	일반접촉
주 접촉면	"3D요소면 6개" 선택 (그림참조)
종속 접촉면	"3D요소면 110개" 선택 (그림참조)

2. [적용] 버튼 클릭.

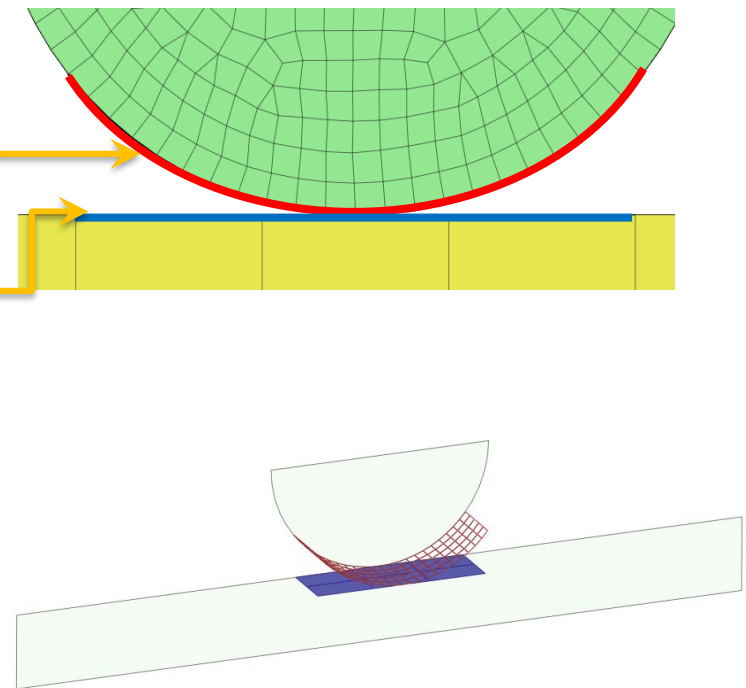
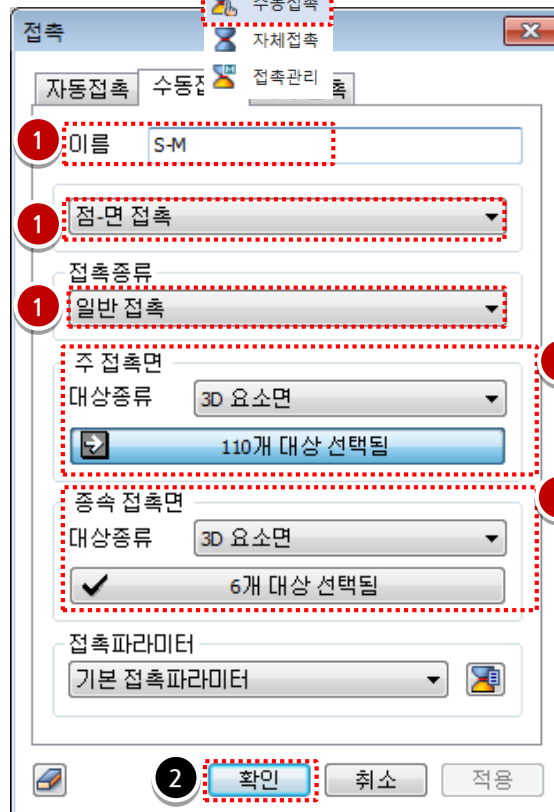
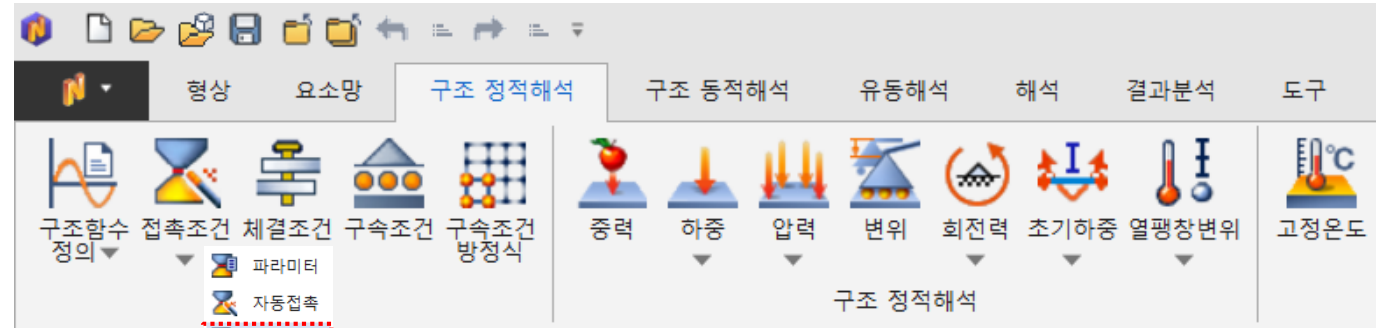


작업순서

1. 수동접촉 설정

이름	S-M
접촉방법	점-면 접촉
접촉종류	일반접촉
주 접촉면	"3D요소면 110개" 선택 (그림참조)
종속 접촉면	"3D요소면 6개" 선택 (그림참조)

2. [적용] 버튼 클릭.



작업순서

1. 이름: "M-S" 입력.


해석 종류: [비선형 정적해석] 선택.

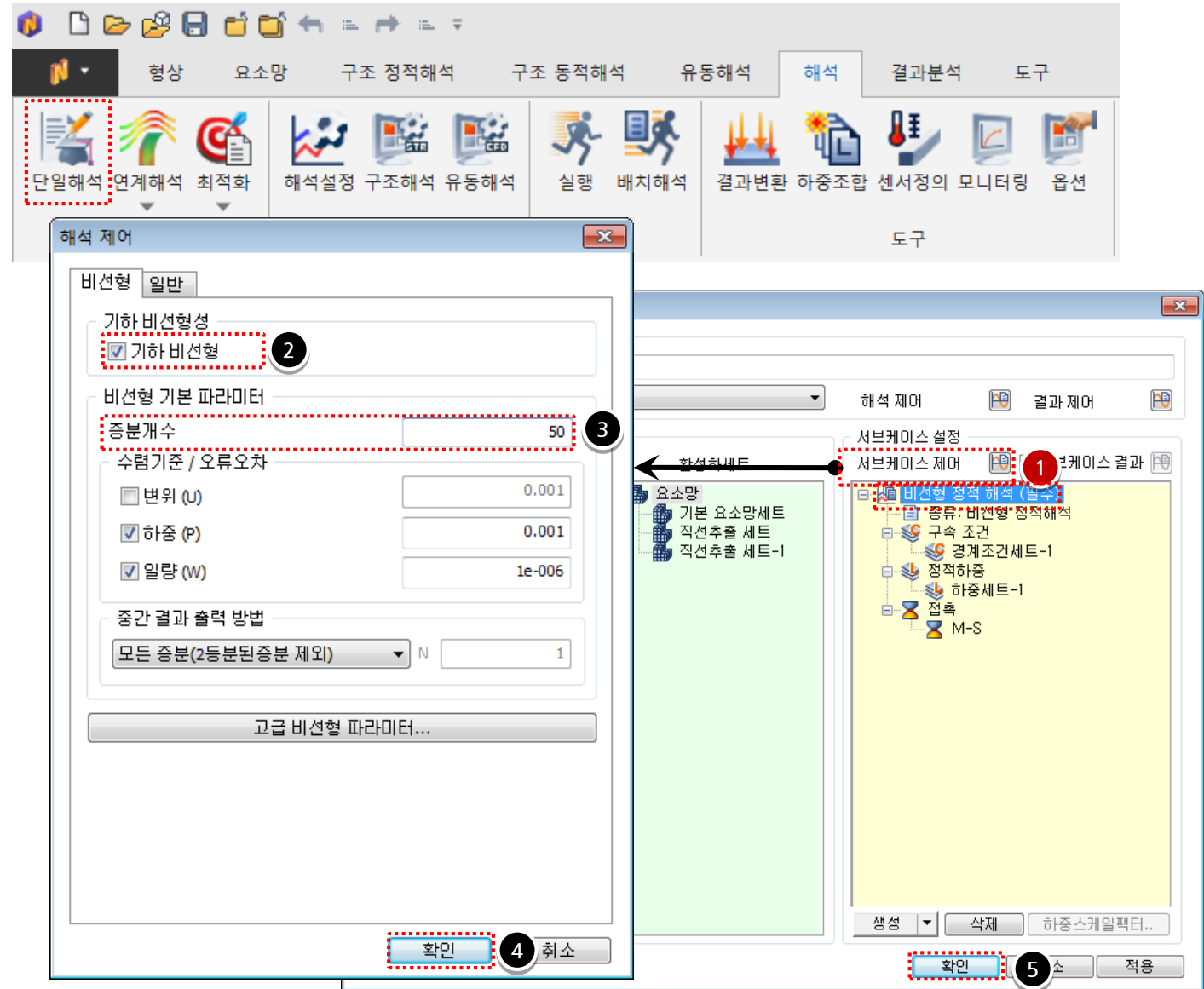
2. 서브케이스 >> 비선형 정적 해석(필수)

>> 접촉:"S-M" 전체세트로 Drag&Drop



작업순서

1. “비선형 정적해석 (필수)” 선택 후,
서브케이스 제어 [] 클릭.
2. “기하비선형” 체크
3. 증분개수 : “50” 입력
4. [확인] 버튼 클릭.
5. [확인] 버튼 클릭.



The screenshot shows the software interface for setting up a nonlinear static analysis. The main window has tabs for '형상' (Shape), '요소망' (Mesh), '구조 정적해석' (Structural Static Analysis), '구조 동적해석' (Structural Dynamic Analysis), '유동해석' (Fluid Analysis), '해석' (Analysis), '결과분석' (Result Analysis), and '도구' (Tools). The '해석' tab is active, showing a tree view of analysis cases. A '해석 제어' (Analysis Control) dialog box is open, showing the '비선형' (Nonlinear) section. The '기하비선형' (Geometric Nonlinear) checkbox is checked. The '증분개수' (Number of Increments) is set to 50. The '확인' (OK) button is highlighted. The '서브케이스 제어' (Subcase Control) dialog box is also open, showing the '비선형 정적해석 (필수)' (Nonlinear Static Analysis (Required)) case selected. The '확인' (OK) button is highlighted.

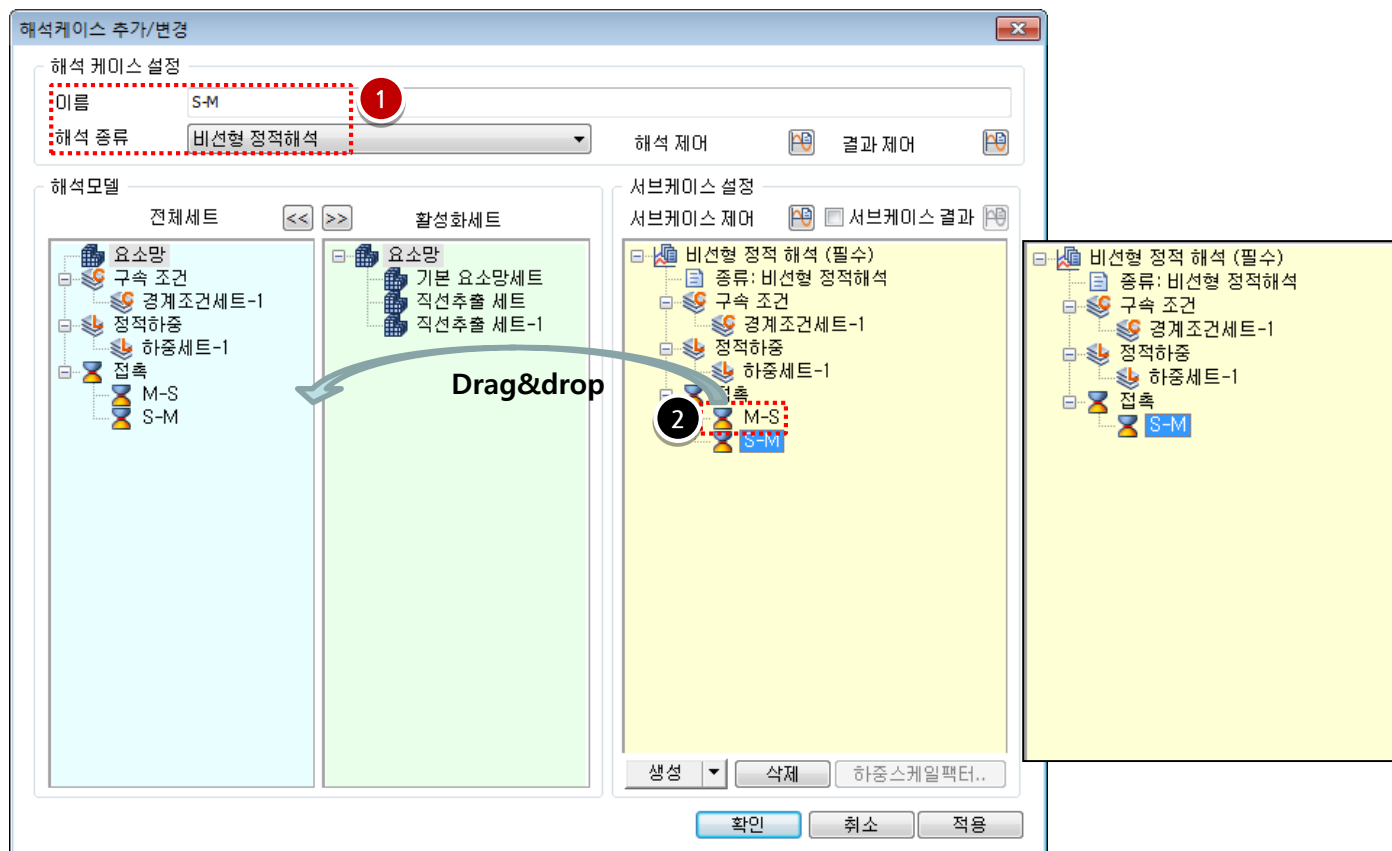
작업순서

1. 이름: "S-M" 입력.

해석 종류: [비선형 정적해석] 선택.

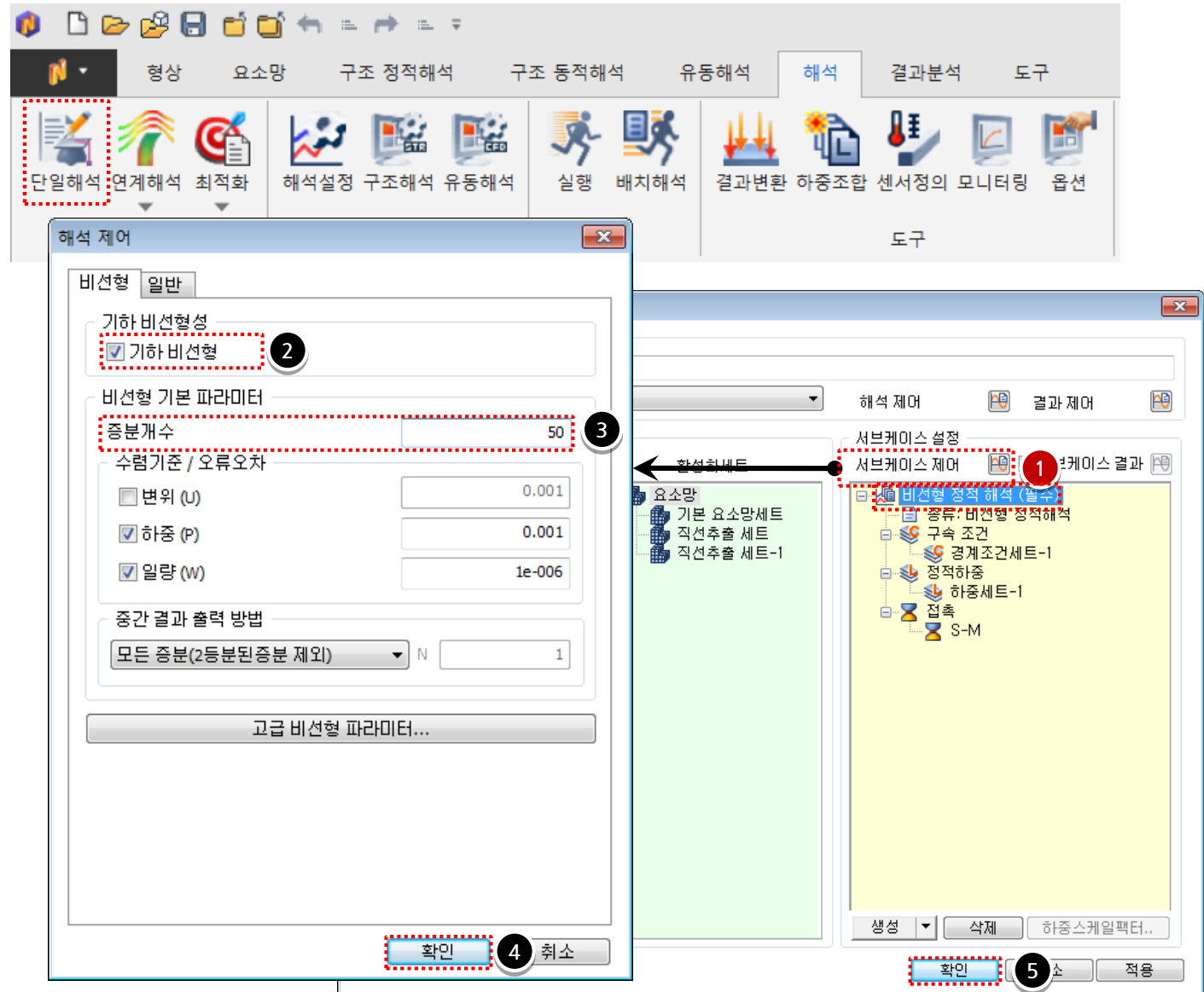
2. 서브케이스 >> 비선형 정적 해석(필수)

>> 접촉:"M-S" 전체세트로 Drag&Drop



작업순서

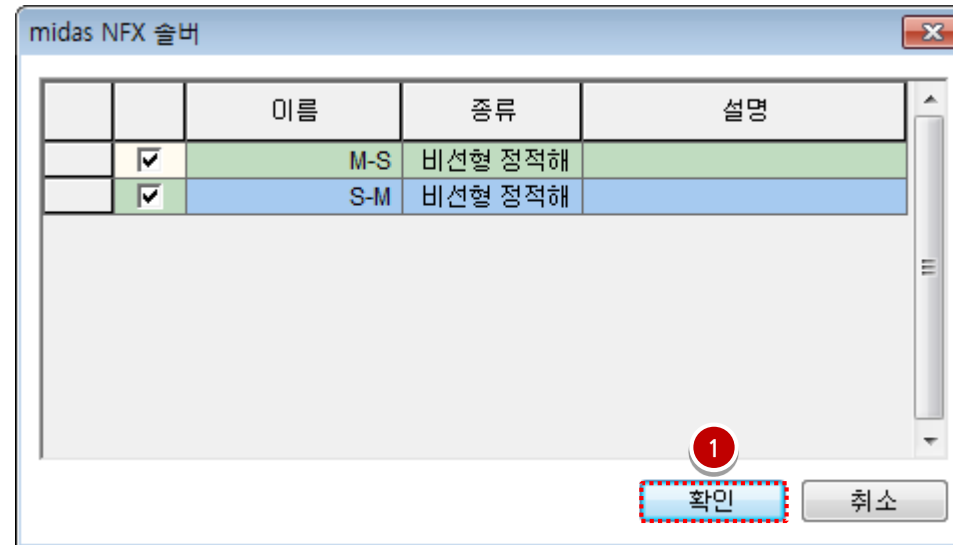
1. “비선형 정적해석 (필수)” 선택 후,
서브케이스 제어 [🔧] 클릭.
2. “기하비선형” 체크
3. 증분개수 : “50” 입력
4. [확인] 버튼 클릭.
5. [확인] 버튼 클릭.



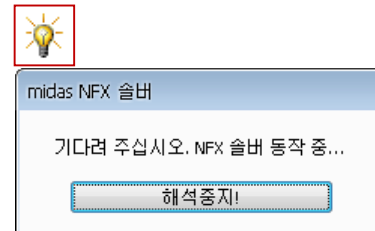
The screenshot displays the Midas NFX software interface. The main menu bar includes options like '형상' (Shape), '요소망' (Mesh), '구조 정적해석' (Structural Static Analysis), '구조 동적해석' (Structural Dynamic Analysis), '유동해석' (Fluid Analysis), '해석' (Analysis), '결과분석' (Result Analysis), and '도구' (Tools). The '해석' (Analysis) menu is active, showing options for '단일해석' (Single Analysis), '연계해석' (Coupled Analysis), '최적화' (Optimization), '해석설정' (Analysis Settings), '구조해석' (Structural Analysis), '유동해석' (Fluid Analysis), '실행' (Execution), '배치해석' (Batch Analysis), '결과변환' (Result Conversion), '하중조합' (Load Combination), '센서정의' (Sensor Definition), '모니터링' (Monitoring), and '옵션' (Options). The '해석 제어' (Analysis Control) dialog box is open, showing the '비선형' (Nonlinear) tab. Under '기하비선형성' (Geometric Nonlinearity), the '기하비선형' (Geometric Nonlinearity) checkbox is checked. Under '비선형 기본 파라미터' (Nonlinear Basic Parameters), the '증분개수' (Number of Increments) is set to 50. Other parameters include '수렴기준 / 오류오차' (Convergence Criterion / Error Tolerance) with values for '변위 (U)' (0.001), '하중 (P)' (0.001), and '일량 (W)' (1e-006). The '중간 결과 출력 방법' (Intermediate Result Output Method) is set to '모든 증분(2등분된증분 제외)' (All Increments (excluding 2-part increments)) with a value of 1. The '확인' (OK) button is highlighted. The '서브케이스 제어' (Subcase Control) panel is also visible, showing the '비선형 정적해석 (필수)' (Nonlinear Static Analysis (Required)) subcase selected, with its '확인' (OK) button highlighted.

작업순서

1. [확인] 버튼 클릭.

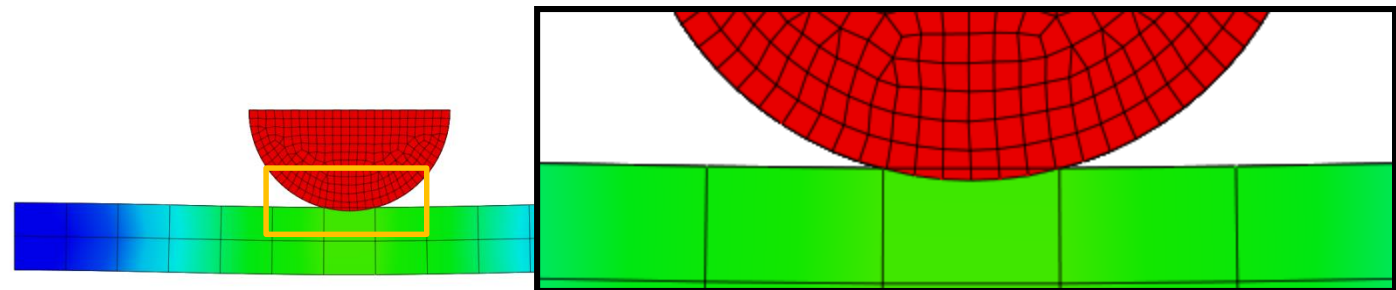
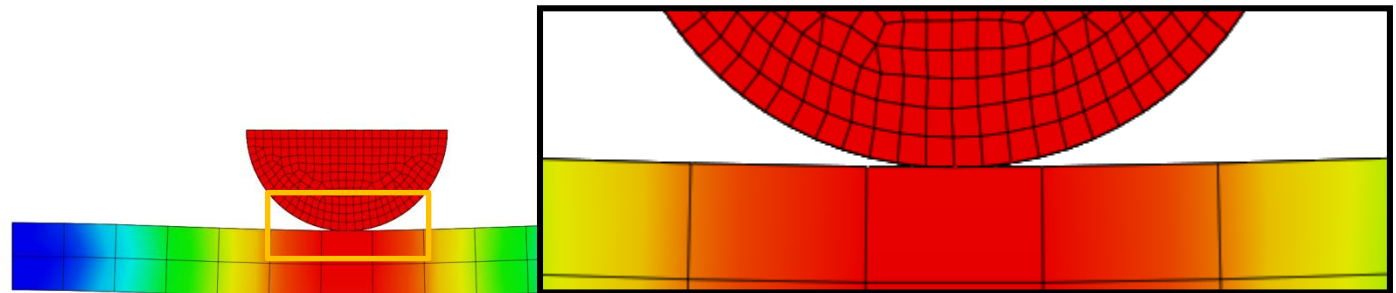
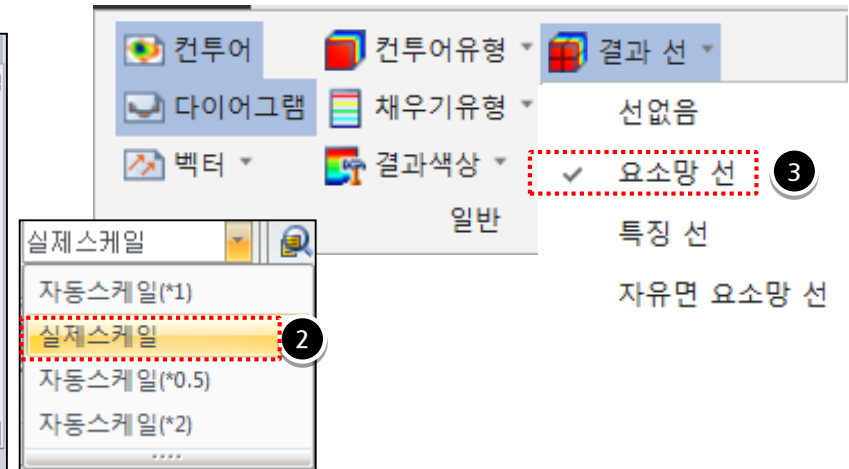
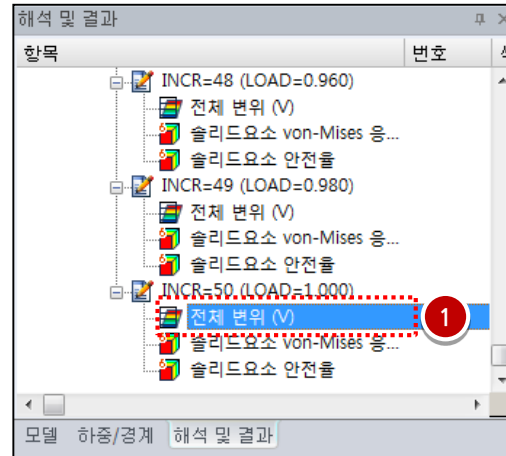


💡 해석을 실행하면 midas NFX 솔버가 작동됩니다. **[해석중지!]** 버튼을 클릭하면 해석이 중지됩니다.



작업순서

1. 해석 및 결과 작업트리에서 전체 변위
더블 클릭.
2. 해석 및 결과 >> 일반 >> 실제스케일
변경
3. 해석 및 결과 >> 일반 >> 결과 선 >>
요소망 선 클릭.
4. S-M : 비선형 정적해석 >> INCR=50
(LOAD=1.000) >> 전체변위 더블클릭.



💡 두 해석 케이스를 비교해 보았을 때,
점-면 접촉해석에서 주 접촉면과 종속절
점을 제대로 설정해 주는 것이 중요하다.

개요

- 비선형 정적해석

- 단위 : N, mm
- 기하모델: Clip.x_t

- 접촉조건 설정

- 일반접촉

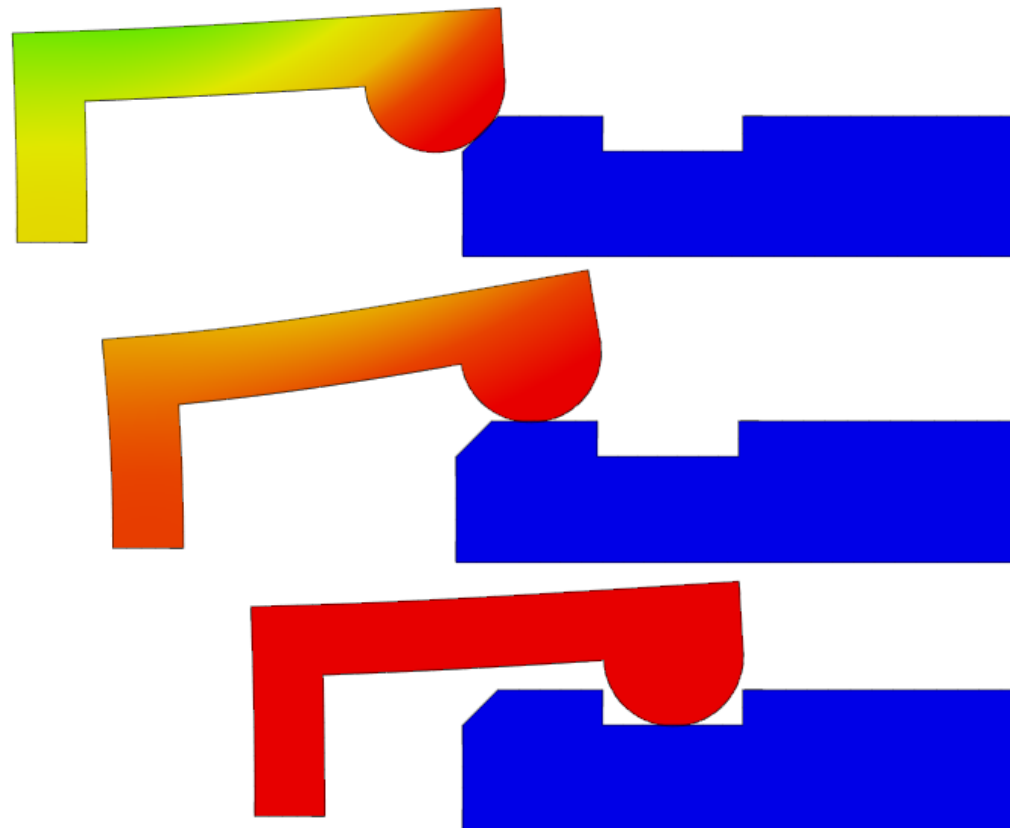
- 경계조건과 하중조건

- 핀구속, 자유도 구속
- 강제변위

- 결과확인

- 전체 변위
- 애니메이션

Clip

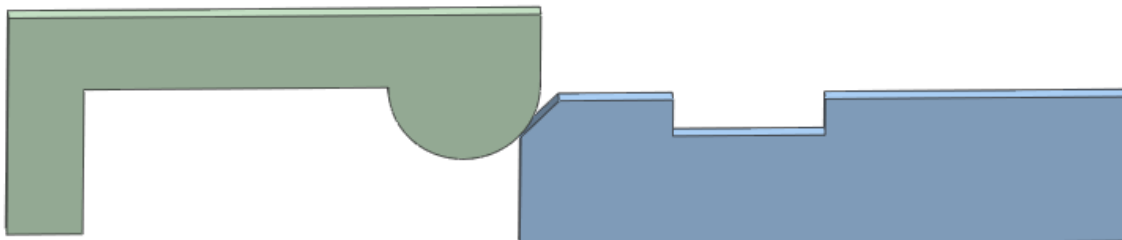


따라하기 목적

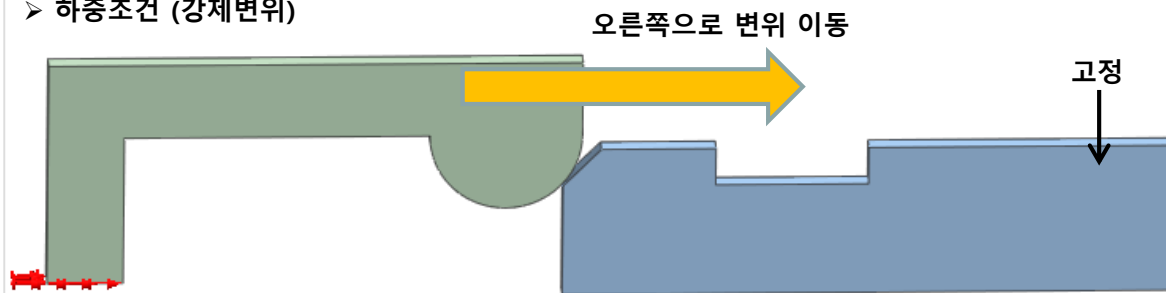
- 경사진 면에서 접촉이 발생하고, 이동변위가 큰 비선형 해석
 - 경사진 부분을 타고 올라가면서 접촉이 발생합니다.
 - 경사진 부분에서의 움직임이 원활하도록 수직, 수평 강성 계수를 조절해 줍니다.
 - 접촉이 발생하는 종속 접촉면에 시드를 이용하여 조밀한 요소망을 생성합니다.

해석 개요

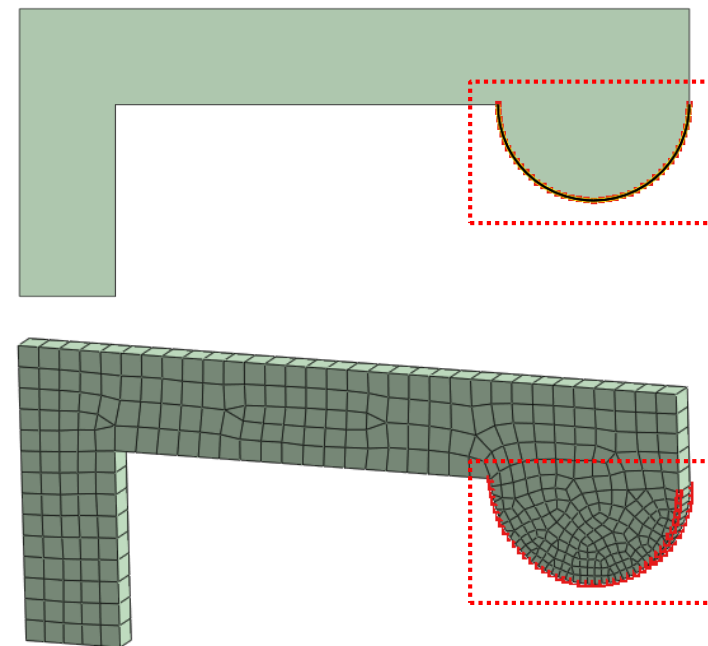
➤ 대상 모델



➤ 하중조건 (강제변위)

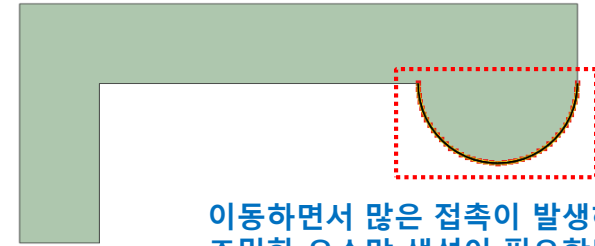
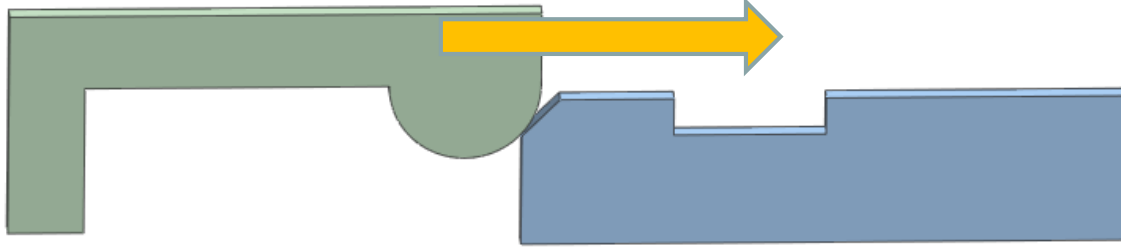


➤ 요소망 생성 (크기 제어 기능 활용)



요소망 생성 (크기제어)

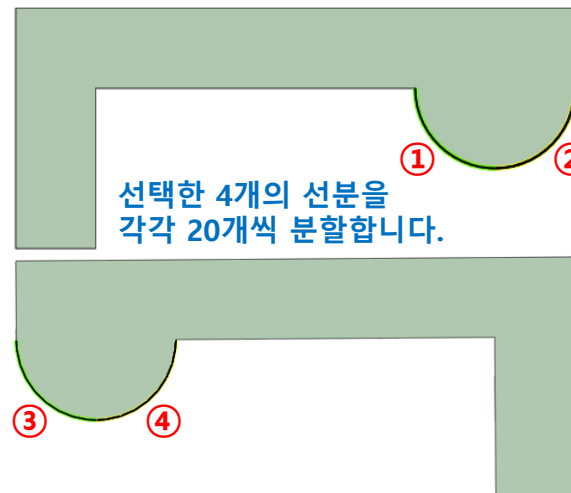
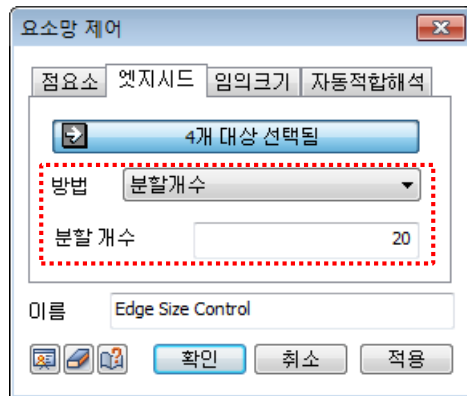
오른쪽으로 변위 이동



이동하면서 많은 접촉이 발생하므로
조밀한 요소망 생성이 필요합니다.

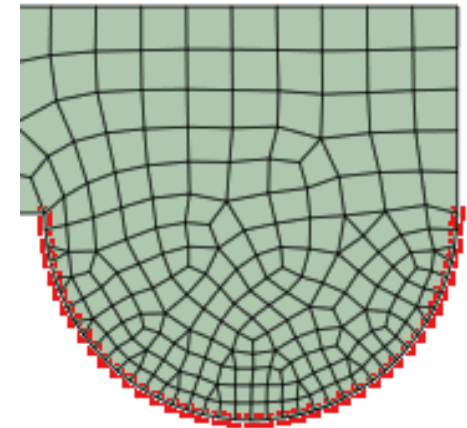


요소망 자동생성을 하기 전에
크기 지정 기능을 이용하여
선택적으로 요소 크기를 조절합니다.




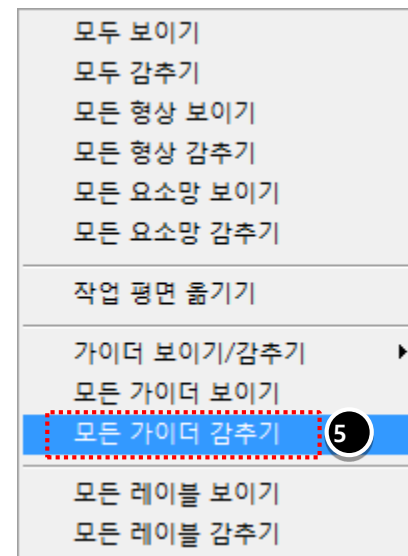
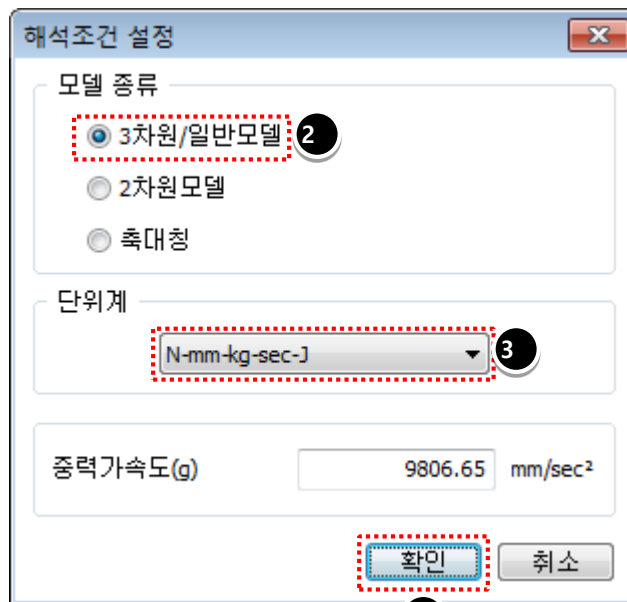
선택한 4개의 선분을
각각 20개씩 분할합니다.


요소망
생성




작업순서

1. [] (새로 만들기) 클릭. 
2. [3차원/일반모델] 선택.
3. 단위계 [N-mm-kg-sec-J] 선택.
4. [확인] 버튼 클릭.
5. 작업 윈도우에서 마우스 오른쪽 버튼 클릭 후, [모든 가이드더 감추기] 선택.



 프로그램을 실행시킨 후 [새로 만들기]를 클릭하면 모든 메뉴가 활성화 됩니다.

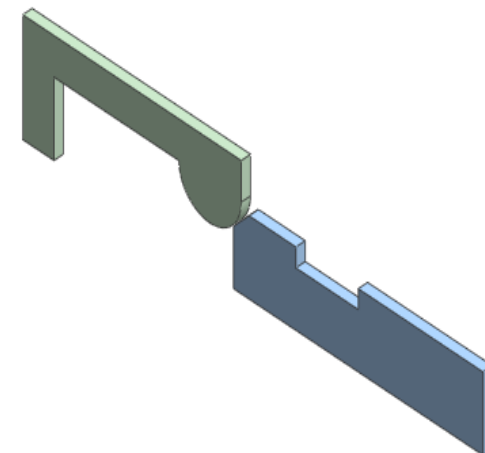
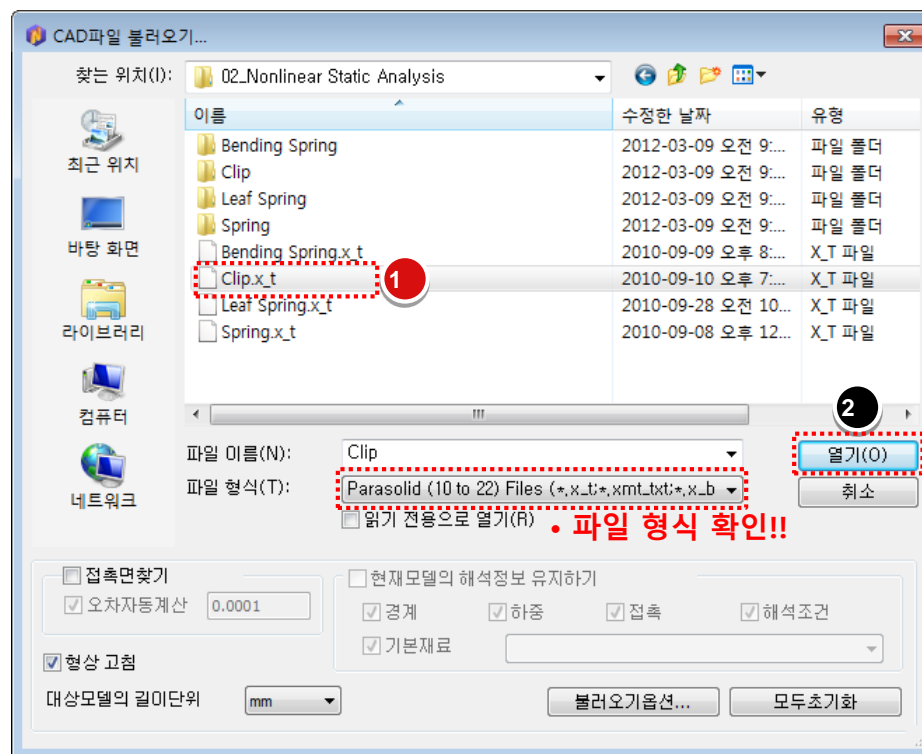
 해석조건설정 대화상자는 시작과 함께 자동으로 보여 집니다.

작업순서

1. 모델 선택: **Clip.x_t** 선택.
2. [열기] 버튼 클릭.

※ 프로그램이 설치된 하위 폴더의
ManualsWTutorialsWFiles 폴더 안에
따라하기의 모델들이 있습니다.

💡 [접촉면찾기] 옵션은 기본 설정이며,
자동으로 접촉면을 찾아줍니다.
이번 따라하기에서는 접촉 설정방법
을 습득하기 위해 자동 옵션을 사용
하지 않습니다.



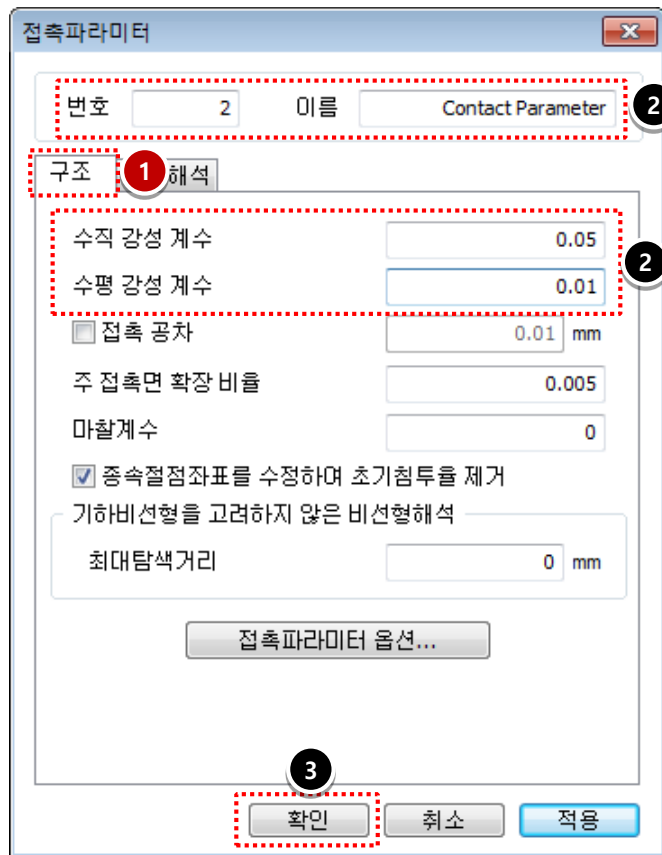
작업순서

1. [구조] 탭 선택.

2. 접촉파라미터 입력

이름	Contact Parameter
수직 강성 계수	0.05
수평 강성 계수	0.01

3. [확인] 버튼 클릭.



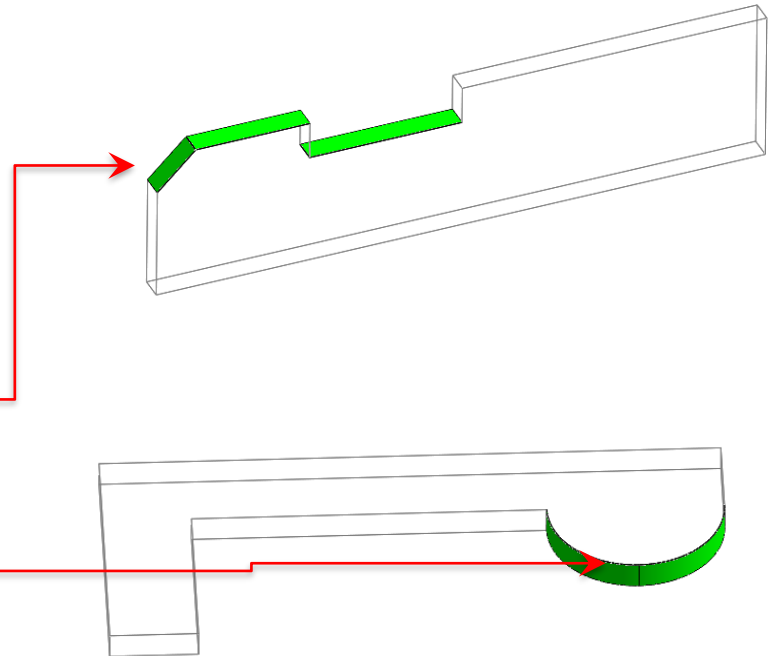
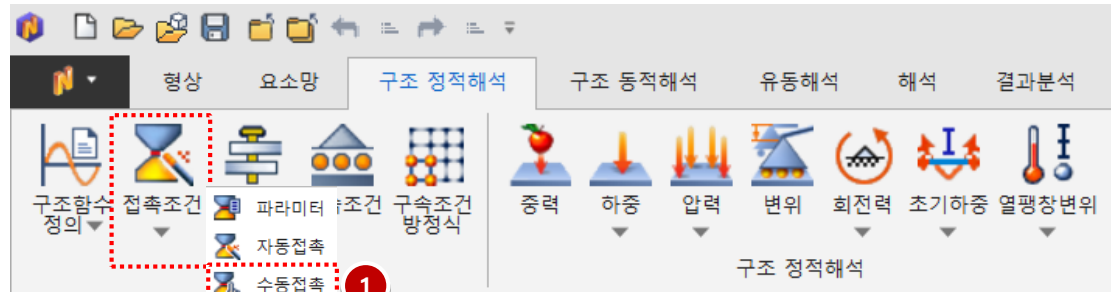
💡 원활한 해석의 수렴을 위하여 수직과 수평 강성 계수를 조절합니다. 강성 계수를 기본 설정보다 작게 설정하는 경우에는 접촉해석의 수렴성이 좋아지나, 결과의 오차가 다소 발생할 수 있기 때문에 반드시 필요할 때에만 수정하도록 합니다.

작업순서


1. [수동접촉] 탭 선택.
2. 수동접촉조건 입력

이름	Contact
접촉종류	일반접촉
주 접촉면 대상 종류	면
주 접촉면 대상 선택	3개 선택
종속 접촉면 대상 종류	면
종속 접촉면 대상 종류	2개 선택
접촉파라미터	Contact Parameter

3. [확인] 버튼 클릭.



작업순서

1. [] (잇면) 클릭.

2. 구속조건 입력

이름	Fix_1
대상종류	면
대상선택	3개 선택
조건	핀구속 

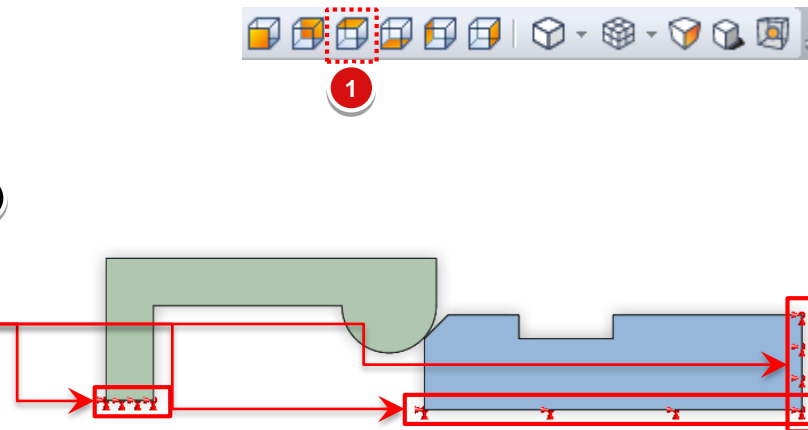
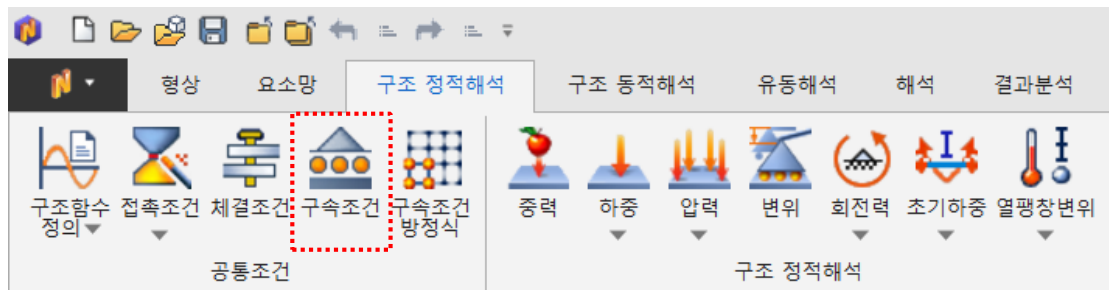
3. [적용] 버튼 클릭.

고정구속: X, Y, Z 병진자유도 및

회전 자유도 구속

핀구속: X, Y, Z 병진자유도만 구속


※솔리드 모델에서는 회전자유도가 없기 때문에 핀구속 조건으로도 모든 자유도가 구속됩니다.



작업순서

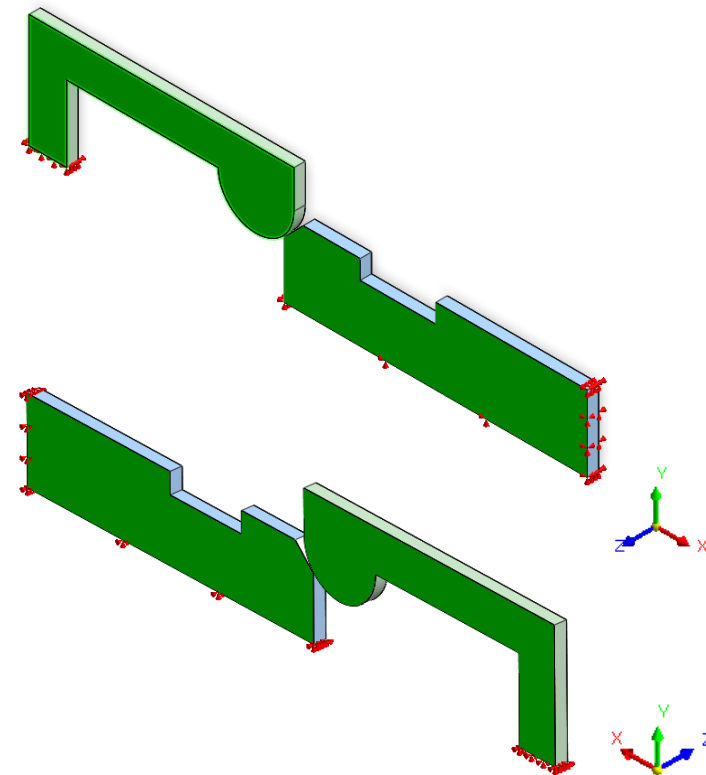
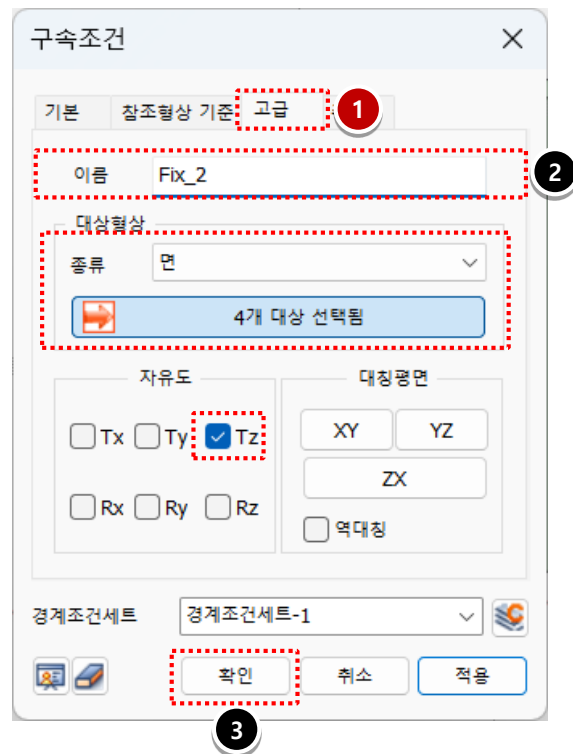
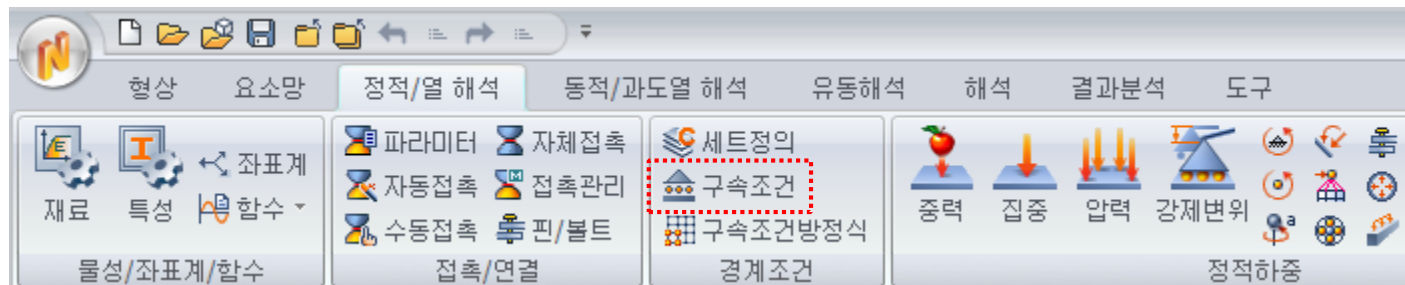
1. [고급] 탭 선택.

2. 구속조건 입력


이름	Fix_2
대상종류	면
대상선택	4개 선택
조건	Tz 구속 

3. [확인] 버튼 클릭.

XY평면에 대한 대칭조건을 부여합니다. 솔리드 모델에서는 회전자유도가 없기 때문에 Tz 구속만으로도 대칭조건이 만족됩니다.



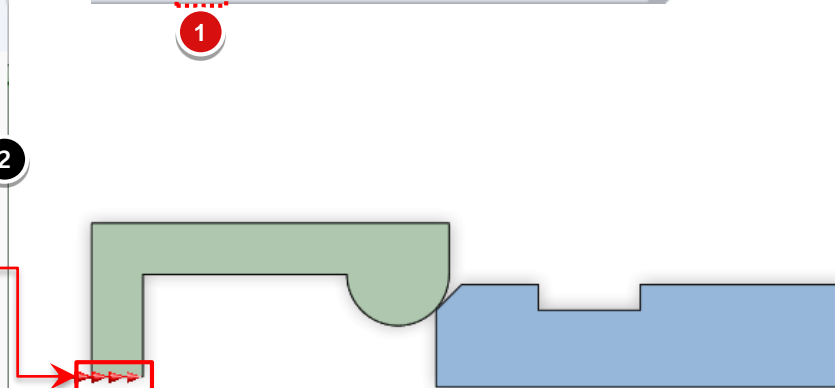
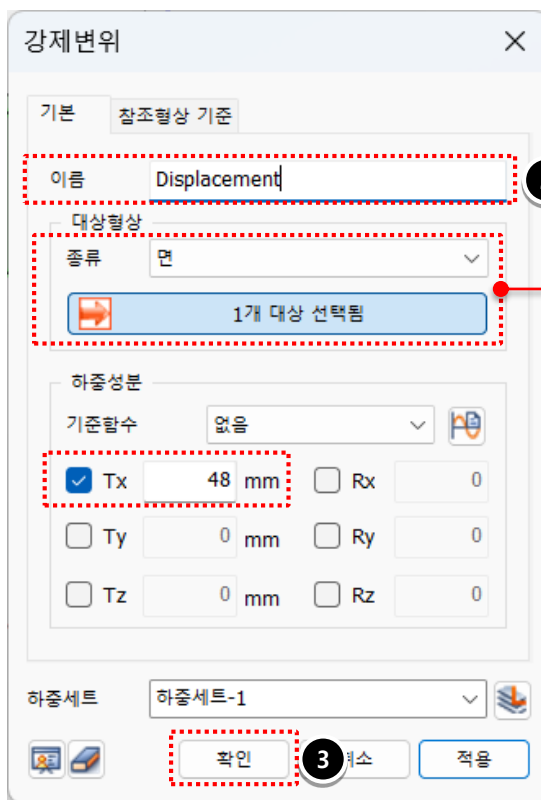
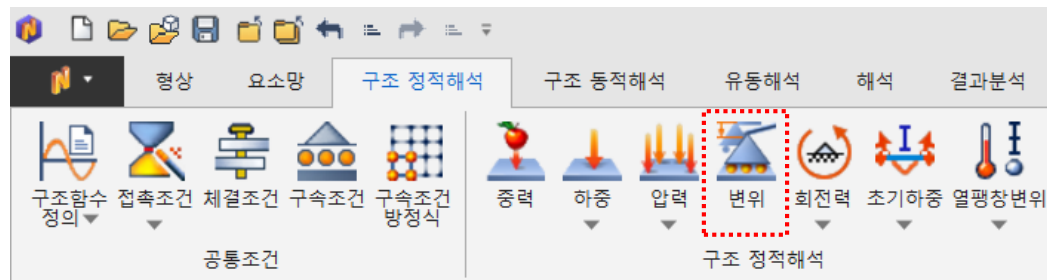
작업순서

1. [] (윗면) 클릭.

2. 강제변위조건 입력

이름	Displacement
대상종류	면
대상선택	1개 선택
조건	Tx : 48 (mm)

3. [확인] 버튼 클릭.




작업순서

1. [엣지시드] 탭 선택.

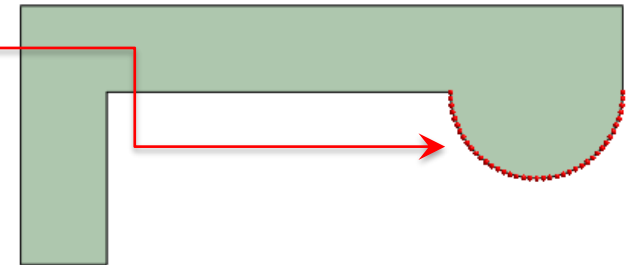
2. 요소망 제어

대상종류	선
대상선택	4개 선택
방법	분할개수 : 20개
이름	Edge Size Control



3. [확인] 버튼 클릭.

 반원 형태에서 2개의 선분을 선택하고, 반대편도 2개의 선분을 선택합니다. (총 4개의 선분 선택)

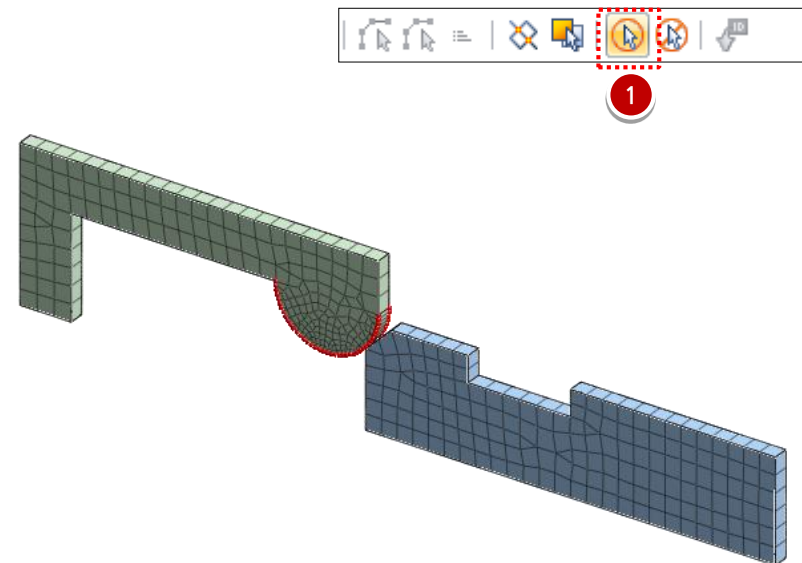
엣지시드는 요소망 생성 시에 우선 적용되기 때문에 파트의 특정 부위에 조밀한 요소망을 작성하는 경우에 사용합니다.



작업순서

1. [] (전체 선택) 클릭.
2. 하이브리드 요소망(육면체 중심) 선택.
3. 요소 크기설정: 자동 설정값 사용.
(3.93으로 조절) 
4. [확인] 버튼 클릭.

요소의 최대 크기를 의미합니다.

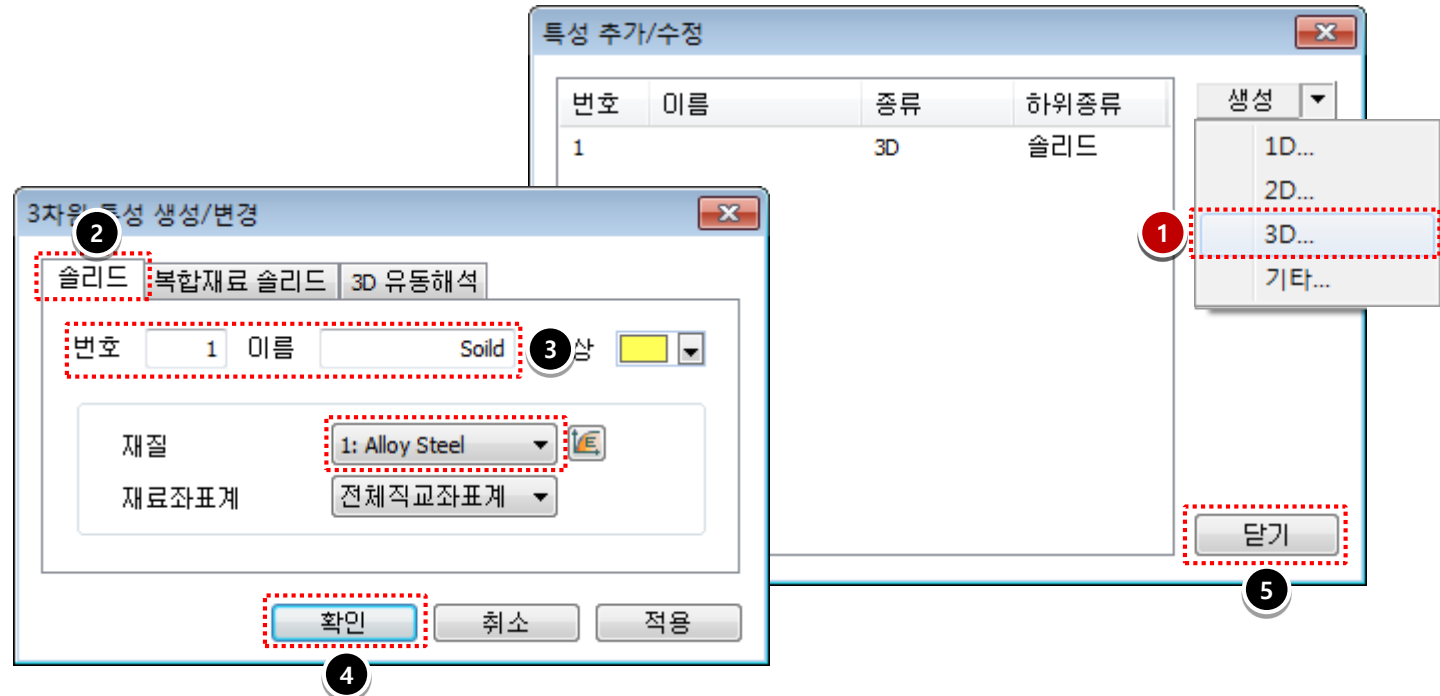



작업순서

1. 생성 >> 3D 클릭
2. [솔리드] 탭 선택.
3. 특성 입력

번호	1
이름	Solid
재질	1: Alloy Steel 

4. [확인] 버튼 클릭.
5. [닫기] 버튼 클릭.




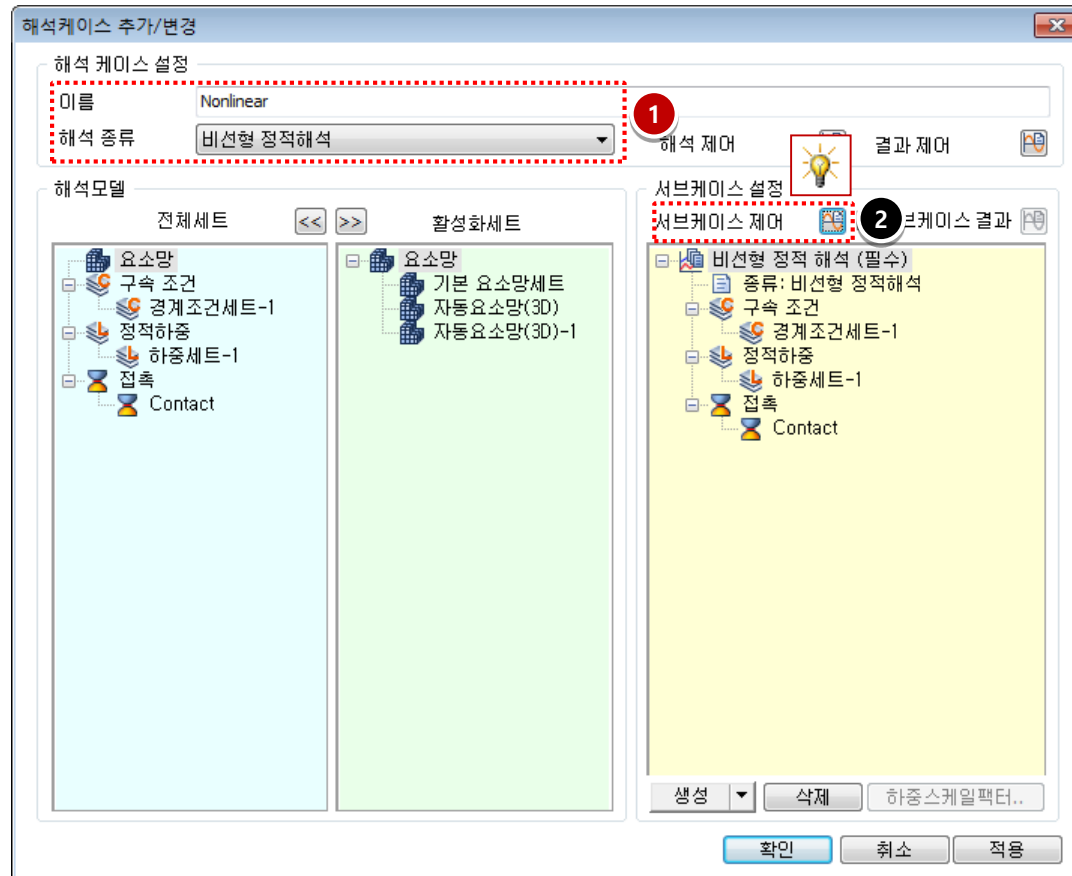
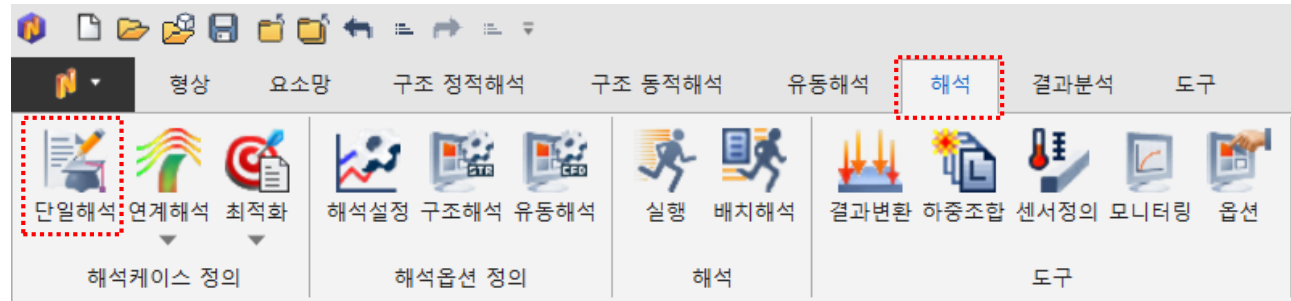
 기본 재질을 사용하여 특성을 정의합니다.


작업순서

1. 해석케이스 설정

이름	Nonlinear
해석 종류	비선형 정적해석

2. [] (서브케이스 제어) 버튼 클릭.
 (“비선형 정적 해석 (필수)” 서브케이스를 클릭해야 활성화됩니다.)



-  기본적으로 현재 작업된 요소망세트, 경계조건, 하중조건 등이 모두 활성화됩니다.

작업순서

1. [비선형] 탭 선택.
2. [기하비선형] 체크.
3. 비선형 기본 파라미터 설정

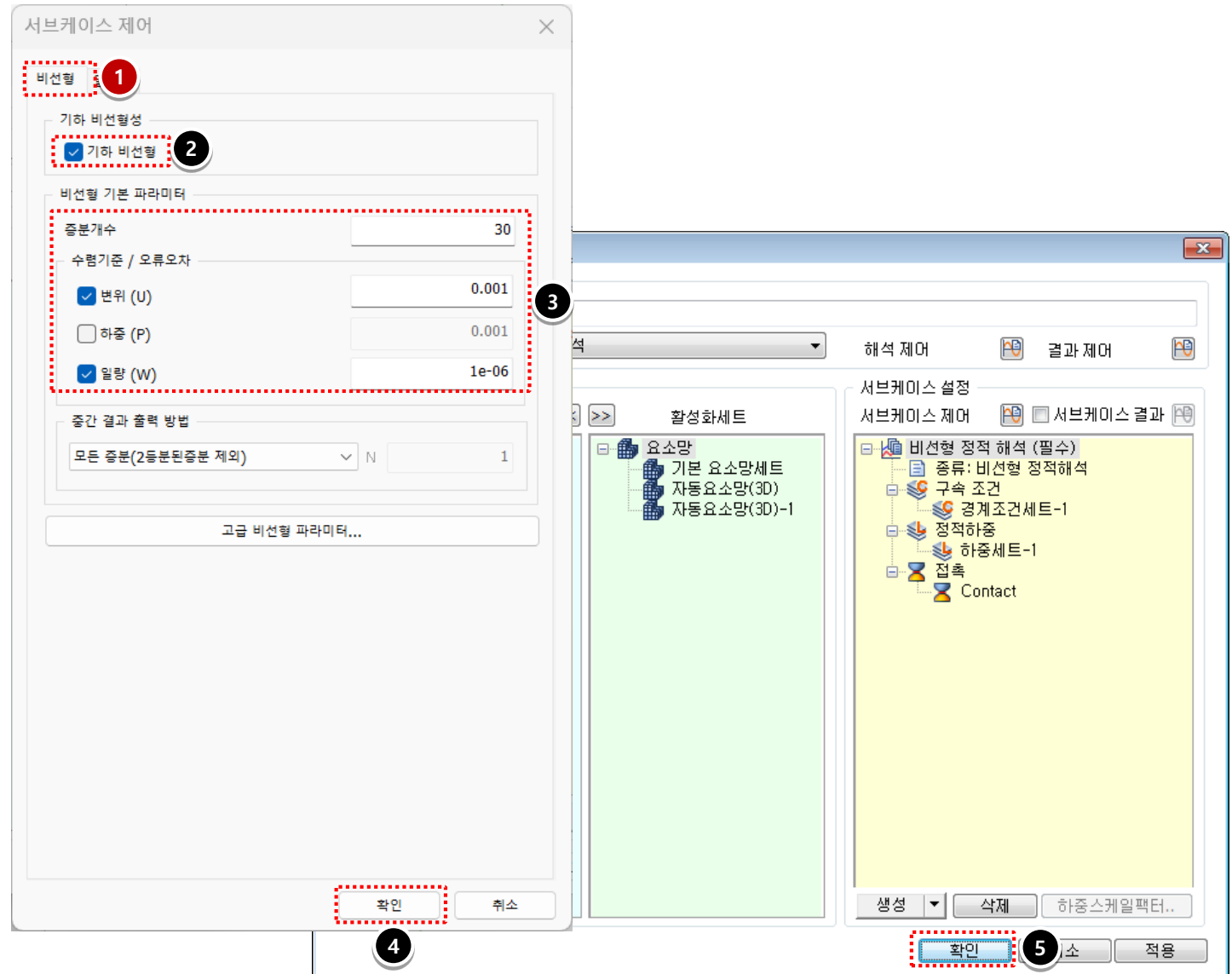
증분개수	30
변위 체크	0.001
하중 체크 해제	
일량 체크	0.0001

4. [확인] 버튼 클릭.
5. [확인] 버튼 클릭.

원활한 수렴을 위하여 증분개수와 일량 기준의 오차를 초기값보다 큰 값으로 설정합니다.

오류오차는 수렴이 여의치 않은 경우에 한해서만 조정하고 다른 조건들을 우선 수정한 후, 차선택으로만 사용하도록 합니다.

일량을 기본으로 하여 변위와 하중 중에서 추가로 1개를 더 선택합니다. 일반적으로 변위 기준은 하중에 비해 수렴에 유리한 편입니다.



서버케이스 제어

비선형 1

기하 비선형성

기하 비선형 2

비선형 기본 파라미터

증분개수 30

수렴기준 / 오류오차

변위 (U) 0.001

하중 (P) 0.001

일량 (W) 1e-06

중간 결과 출력 방법

모든 증분(2등분된증분 제외) N 1

고급 비선형 파라미터...

확인 4 취소

해석 제어

서버케이스 설정

서버케이스 제어 서버케이스 결과

활성화세트

요소망

- 기본 요소망세트
- 자동요소망(3D)
- 자동요소망(3D)-1

비선형 정적 해석 (필수)

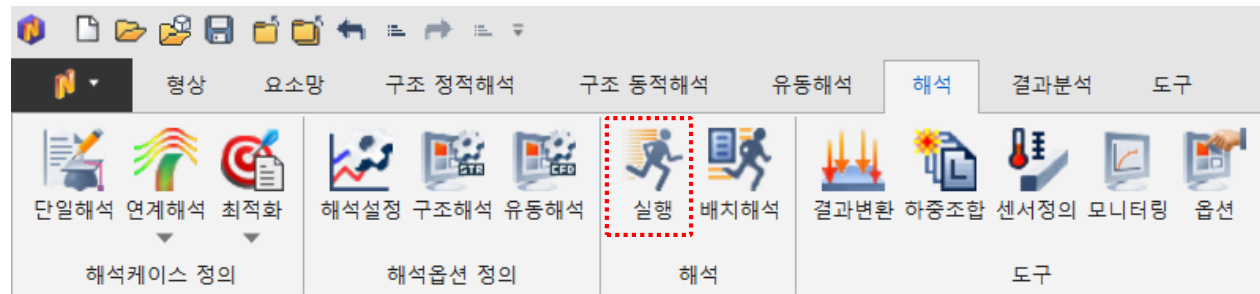
- 종류: 비선형 정적해석
- 구속 조건
- 경계조건세트-1
- 정적하중
- 하중세트-1
- 접촉
- Contact

생성 삭제 하중스케일팩터..

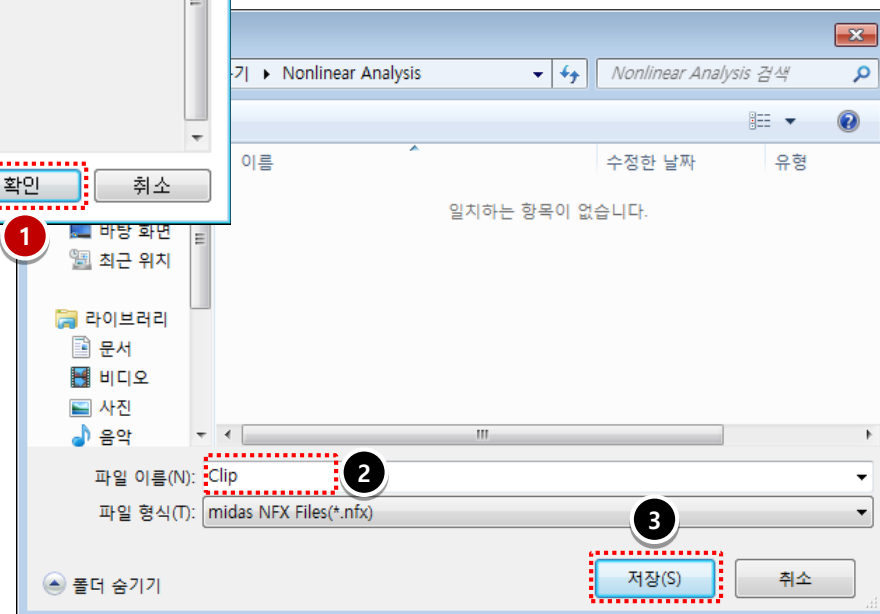
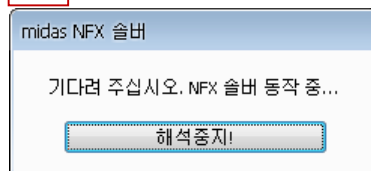
확인 5 소 적용

작업순서





1. [확인] 버튼 클릭.
2. 다른 이름으로 저장: "Clip" 입력.
3. [저장(S)] 버튼 클릭.

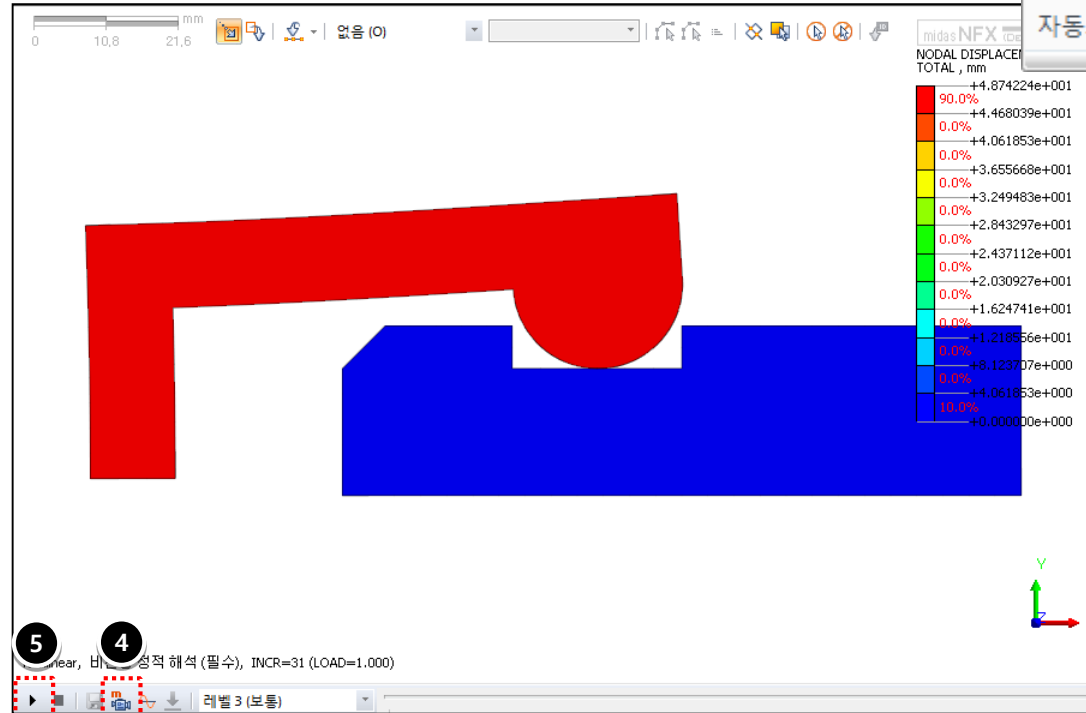
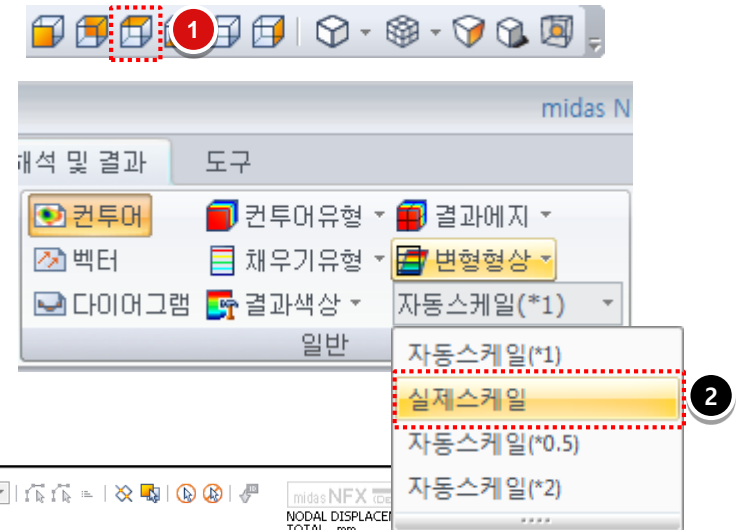
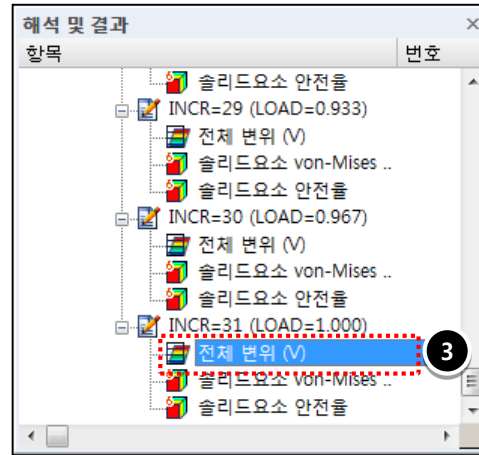




💡 해석을 실행하면 midas NFX 솔버가 작동됩니다. [해석중지!] 버튼을 클릭하면 해석이 중지됩니다.



작업순서

1. [] (위면) 클릭.
2. 해석 및 결과 >> 일반 >> [실제스케일] 선택
3. 해석 및 결과 작업트리에서 전체 변위 더블 클릭.
4. [] (멀티-스텝 애니메이션 녹화) 클릭.
5. [] (재생) 클릭. 



 멀티-스텝 애니메이션 녹화를 이용하면 스텝별 결과를 애니메이션으로 확인할 수 있습니다. (자동으로 전체 스텝 결과에 체크되어 있습니다.) 애니메이션 결과 확인이 끝나면 [] 버튼을 클릭하여 애니메이션 재생을 종료해 주어야 합니다. 이는 다른 후처리 작업 시 발생할 수 있는 조작의 불편함을 최소화하기 위한 작업입니다.

개요

- 비선형 정적해석

- 단위 : N, mm
- 기하모델: Connector.x_t

- 접촉조건 설정

- 일반접촉

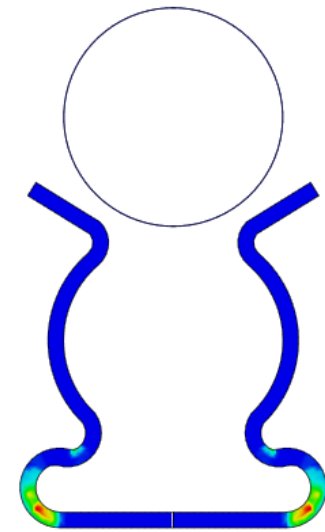
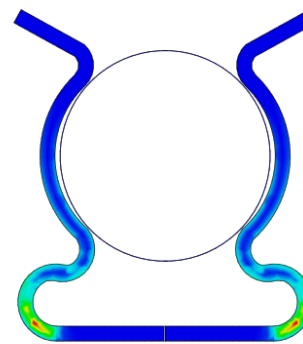
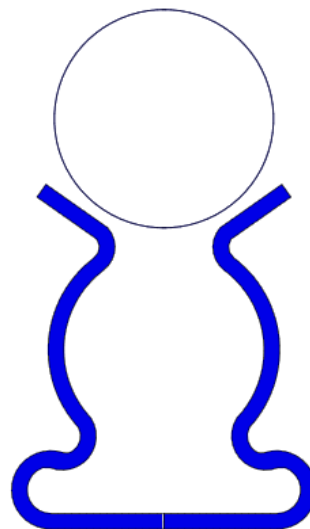
- 경계조건과 하중조건

- 고정구속
- 대칭구속
- 강제변위

- 결과확인

- 전체 변위
- 등가응력
- 소성변형을
- 애니메이션

Connector

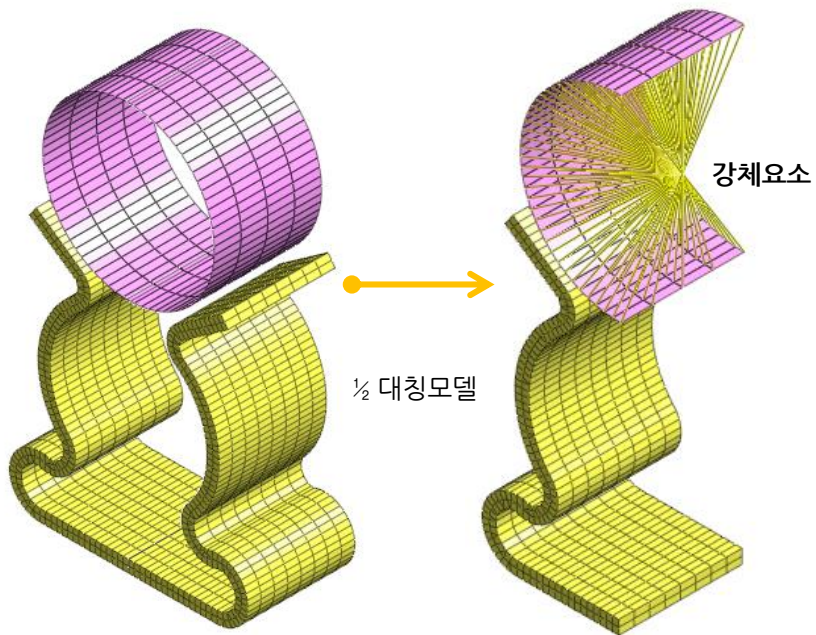


따라하기 목적

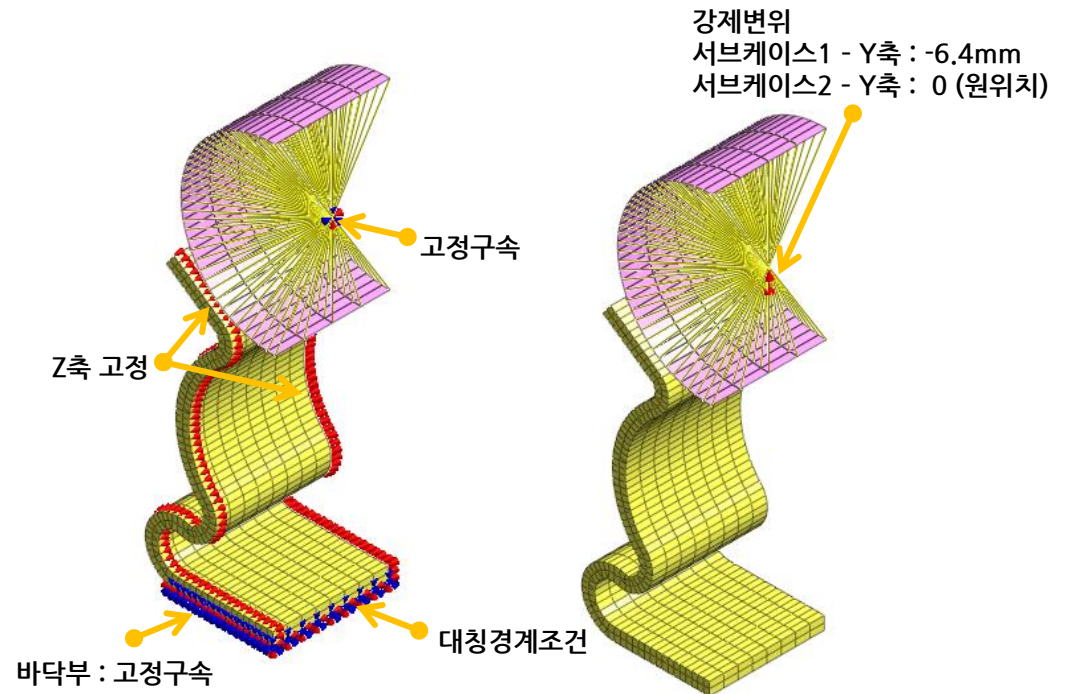
- 접착이 발생하고, 이동변위가 큰 비선형 해석
 - 실린더가 커넥터 안으로 들어가면서 접착이 발생합니다.
 - 실린더가 커넥터 안으로 들어갈 때 발생하는 응력과 소성변형률을 검토합니다.
 - 실린더가 원위치로 돌아왔을 때 남아있는 잔류응력과 영구변형을 확인합니다.

해석 개요


➤ 대상 모델

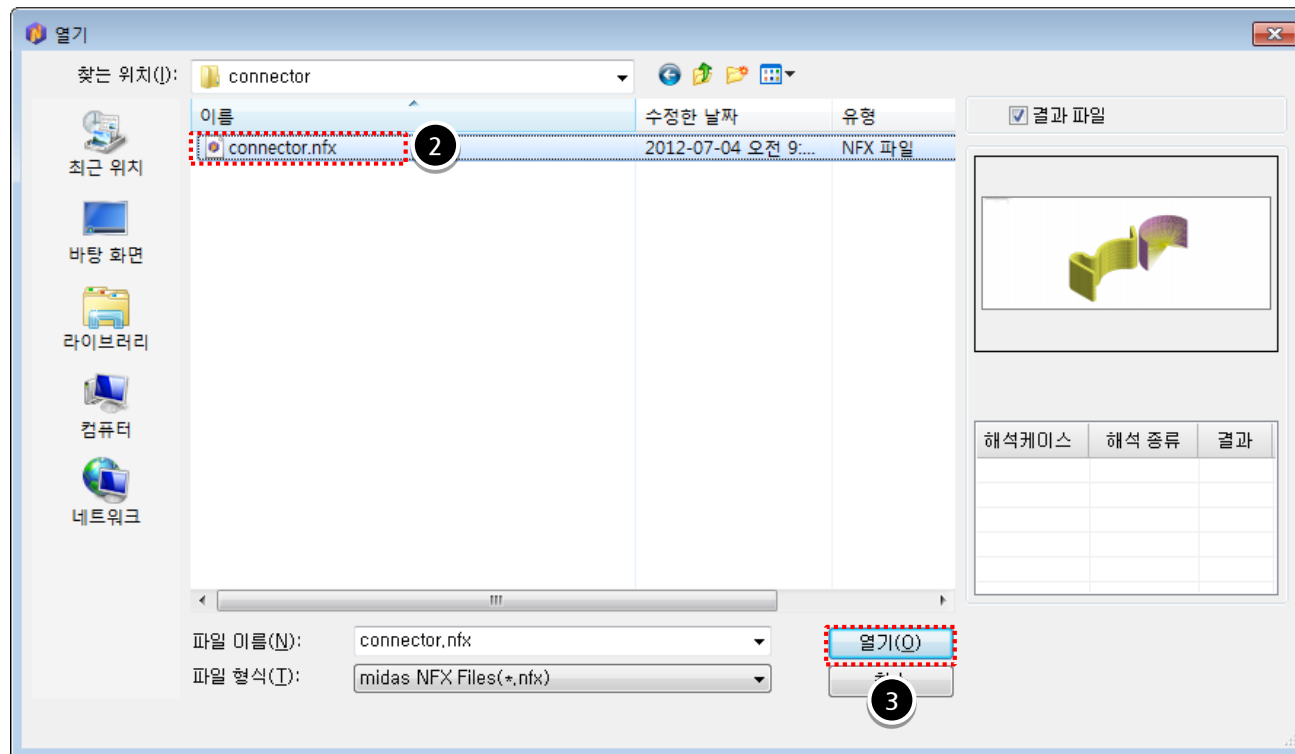


➤ 경계조건 및 하중조건



작업순서

1. [] (열기) 클릭.
2. “connector.nfx” 선택.
3. [열기] 버튼 클릭.

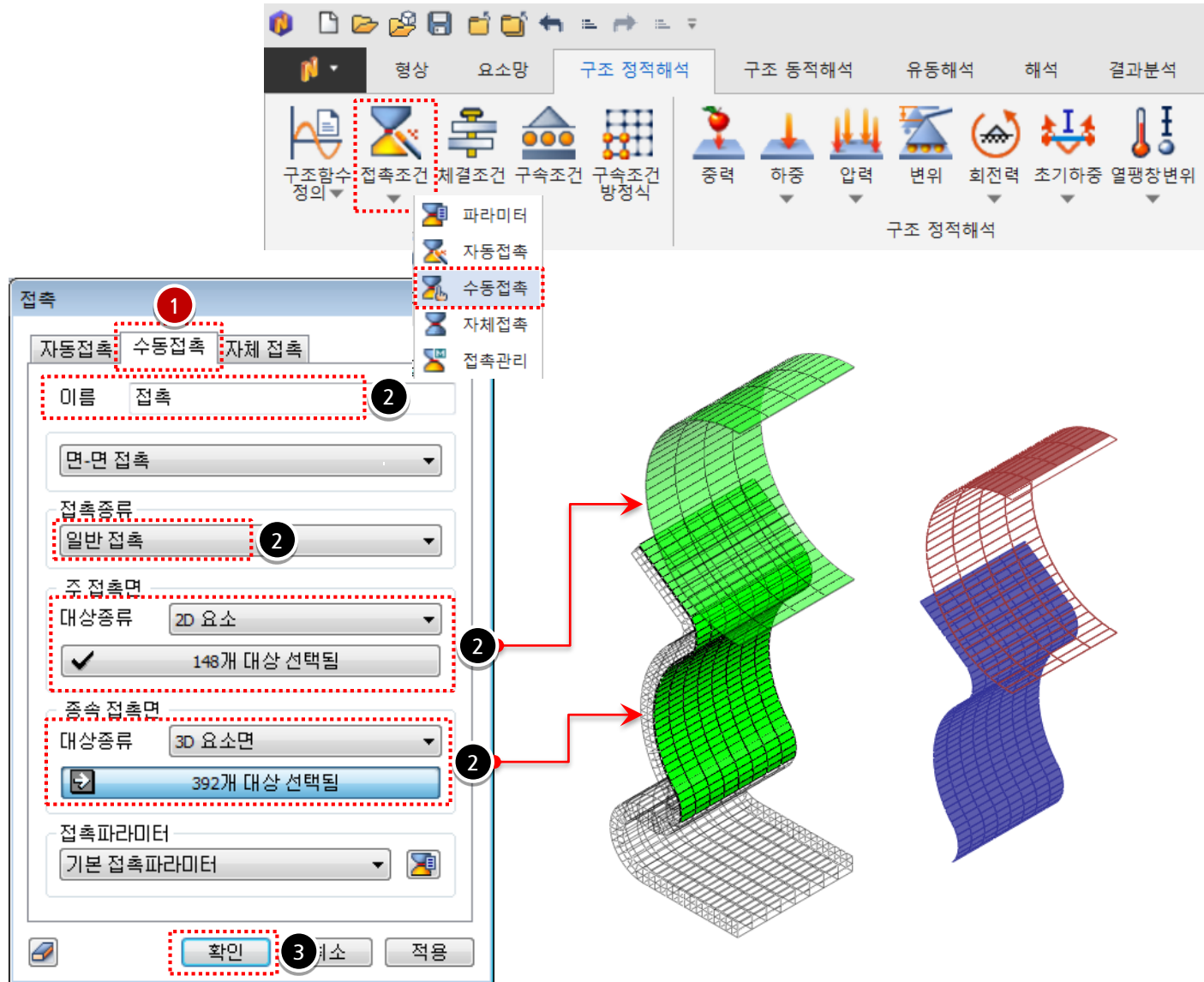


작업순서

1. [수동접촉] 탭 선택.
2. 수동접촉조건 입력

이름	Contact
접촉종류	일반접촉
주 접촉면	2D요소 "148개" 선택(그림참조)
종속 접촉면 대상 종류	3D요소 "392개" 선택(그림참조)

3. [확인] 버튼 클릭.




The screenshot illustrates the manual contact setup process in the software. The top toolbar shows various analysis options, with '구조 정적해석' (Structural Static Analysis) selected. The '접촉' (Contact) dialog box is open, and the '수동접촉' (Manual Contact) tab is active. The dialog contains the following settings:


- 이름 (Name):** Contact
- 면-면 접촉 (Surface-Surface Contact):** Selected
- 접촉종류 (Contact Type):** 일반 접촉 (General Contact)
- 주 접촉면 (Master Contact Surface):** 2D 요소 (2D Element), with 148 elements selected.
- 종속 접촉면 (Slave Contact Surface):** 3D 요소면 (3D Element Surface), with 392 elements selected.
- 접촉파라미터 (Contact Parameters):** 기본 접촉파라미터 (Basic Contact Parameters)

The '확인' (OK) button is highlighted with a red dashed box and a circled '3', indicating the final step in the process. To the right, a 3D model shows a green mesh surface being contacted by a blue mesh surface, with red arrows pointing to the contact areas.

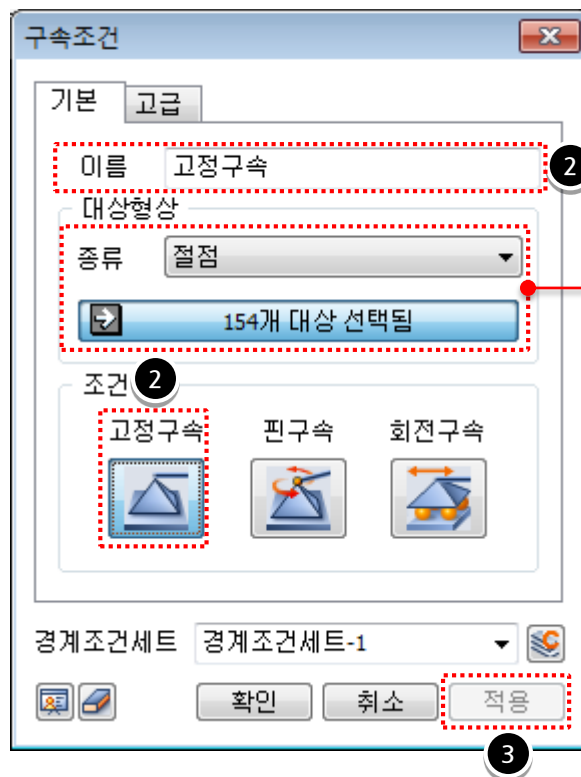
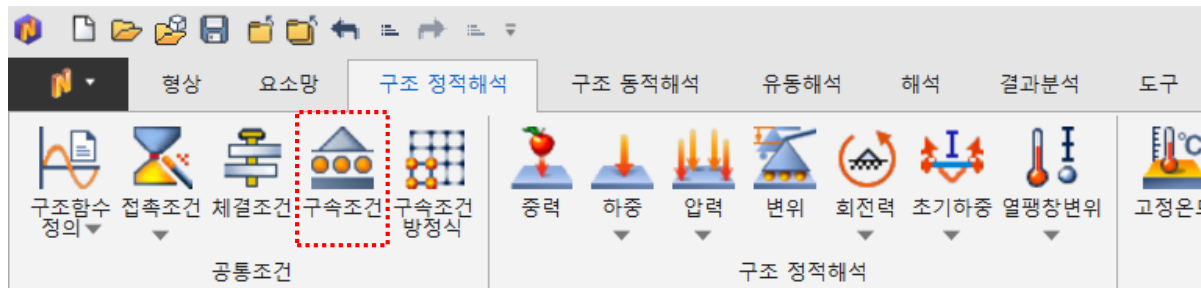
작업순서


1. [ (윗면) 클릭.

2. 구속조건 입력

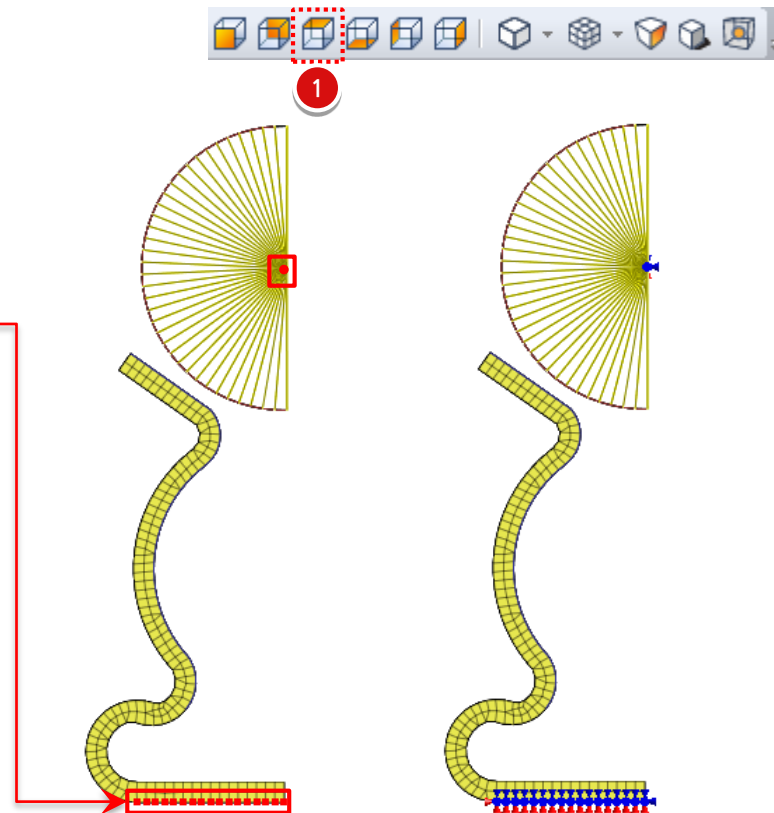
이름	고정구속
대상종류	절점
대상선택	154개 선택 (그림 참조)
조건	고정구속 

3. [적용] 버튼 클릭.



-  고정구속: X, Y, Z 병진자유도 및 회전 자유도 구속
- 핀구속: X, Y, Z 병진자유도만 구속

※솔리드 모델에서는 회전자유도가 없기 때문에 핀구속 조건으로도 모든 자유도가 구속됩니다.



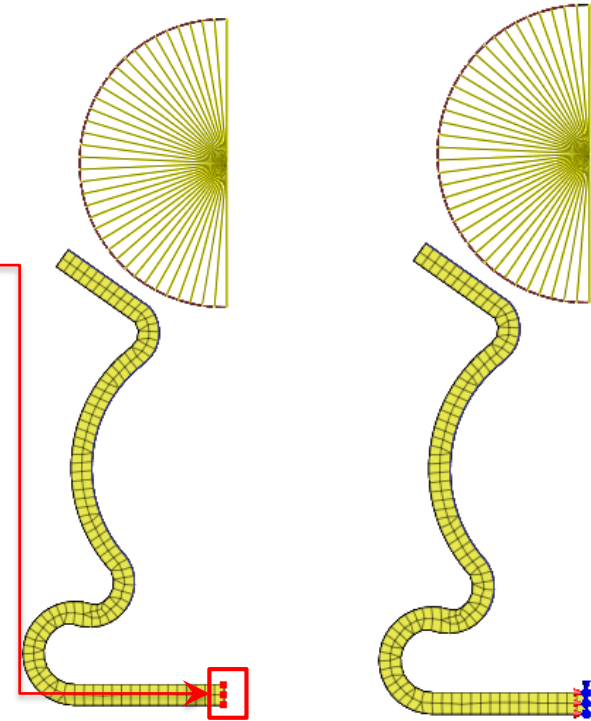
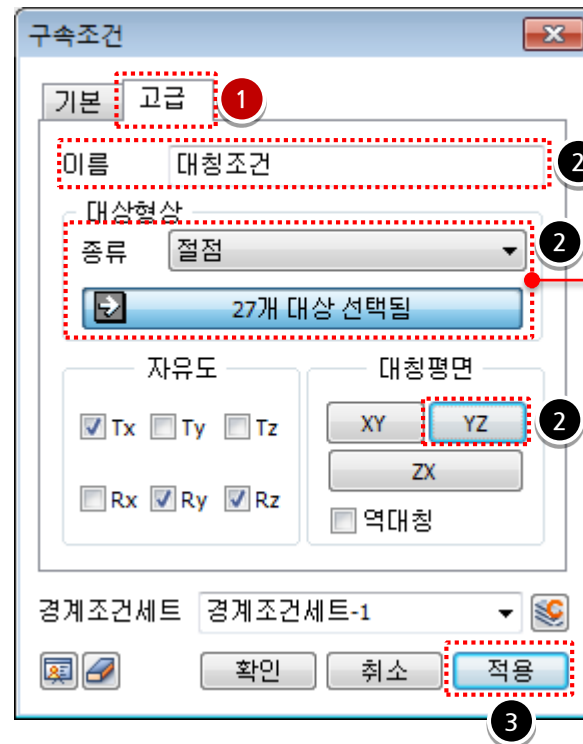
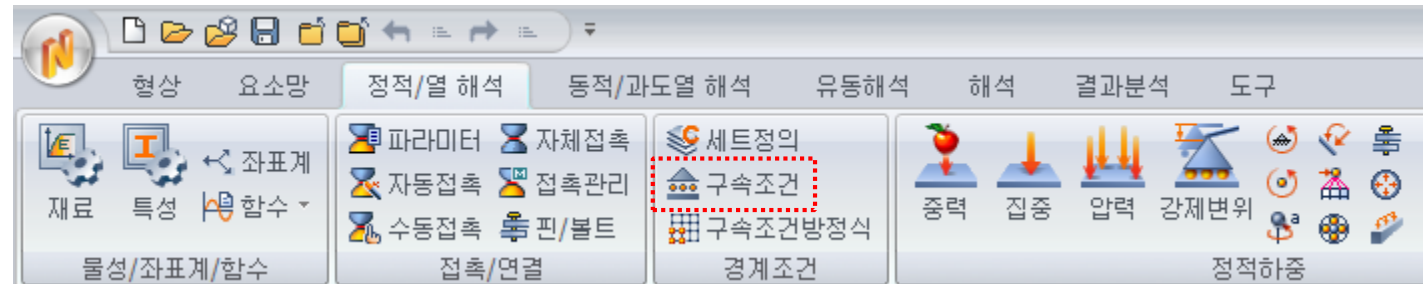
작업순서

1. [고급] 탭 선택.

2. 구속조건 입력

이름	대칭조건
대상종류	절점
대상선택	"27개"선택 (그림 참조)
대칭평면	YZ평면

3. [확인] 버튼 클릭.



작업순서

1. 모델 작업트리 >> 요소망 >>

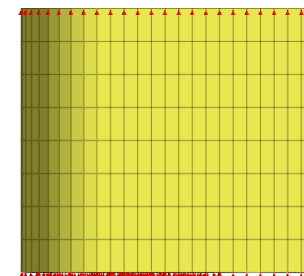
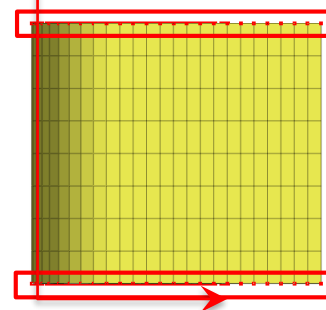
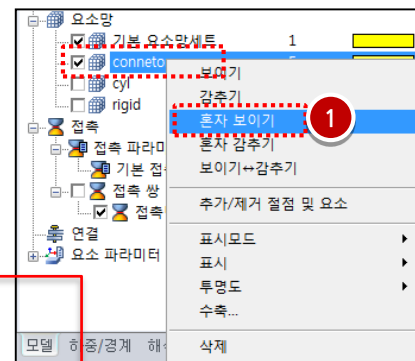
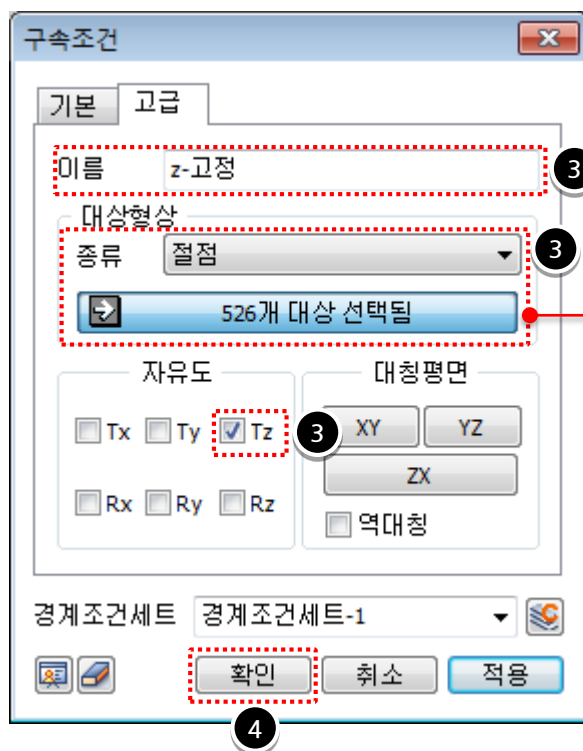
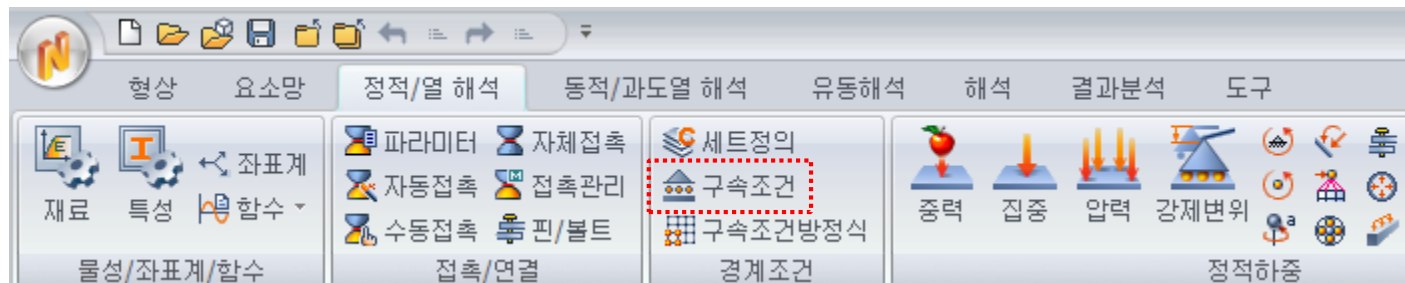
Connector 우클릭 후, [혼자보이기]
클릭.

2. [] (정면보기) 클릭.

3. 구속조건 입력

이름	Z-고정
대상종류	절점
대상선택	"526개"선택 (그림참조)
자유도	Tz

4. [확인] 버튼 클릭.

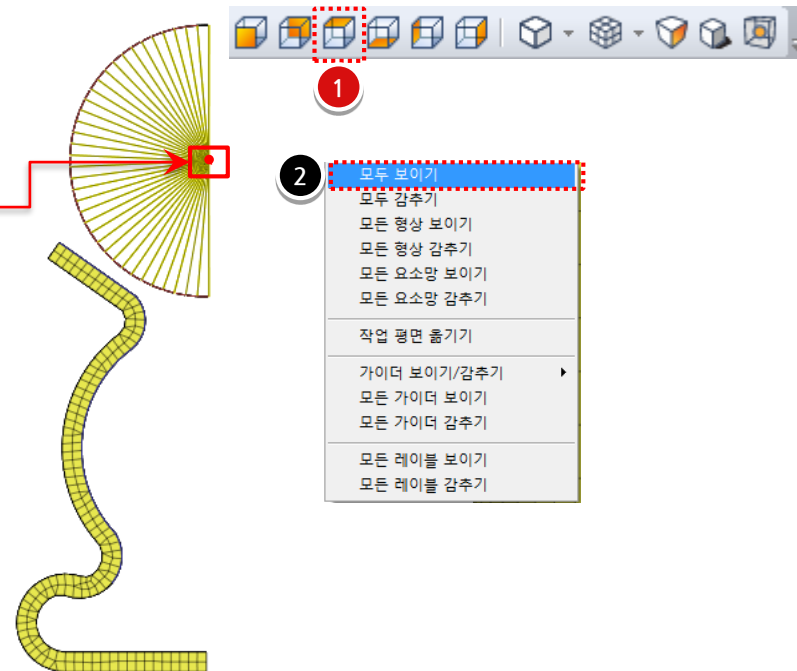
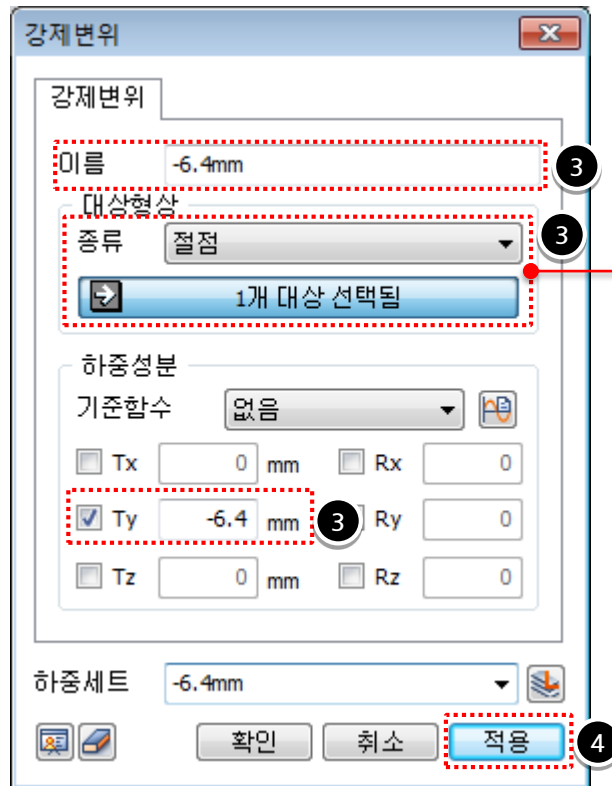
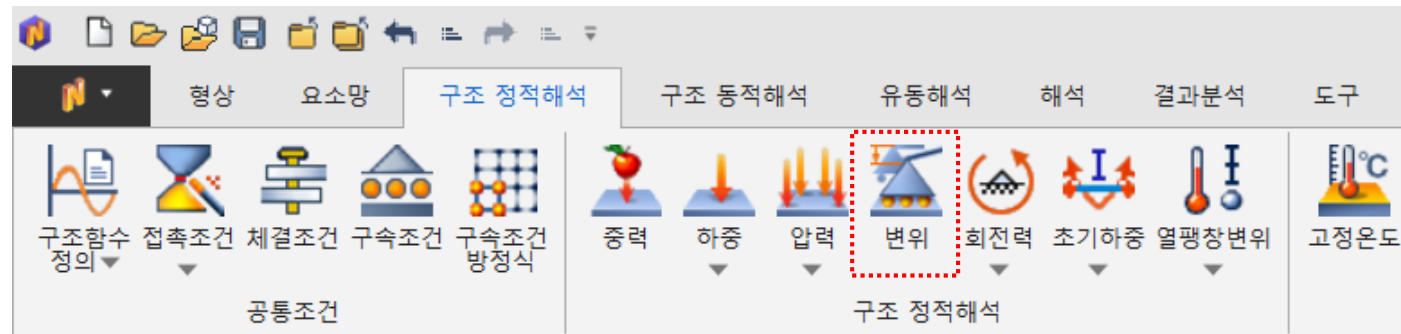


작업순서


1. [] (윗면) 클릭.
2. 작업평면에서 마우스 우클릭 후,
[모두보이기] 클릭.
3. 강제변위 입력

이름	-6.4mm
대상종류	절점
대상선택	"1개" 선택 (그림참조)
조건	Ty: -6.4 (mm)
하중세트	-6.4mm

4. [적용] 버튼 클릭.



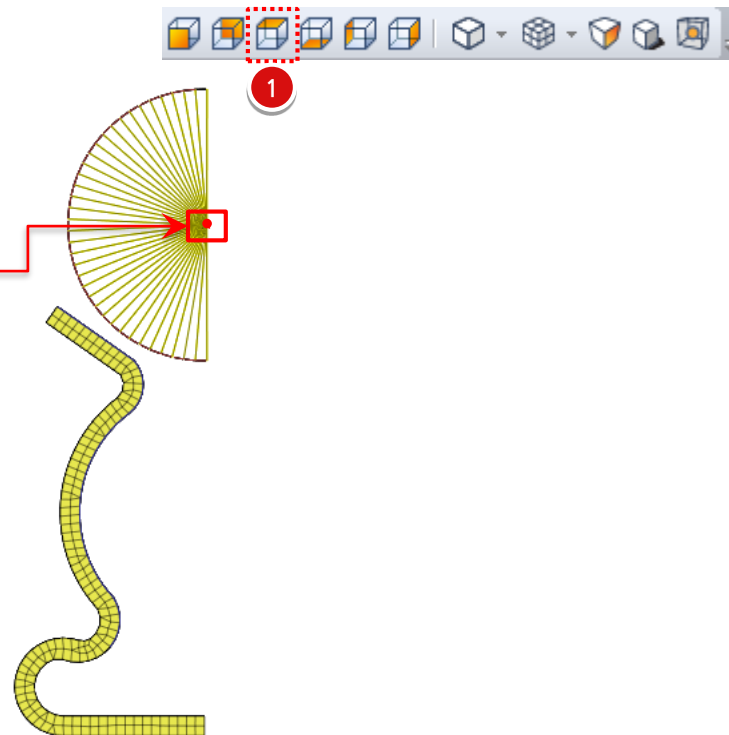
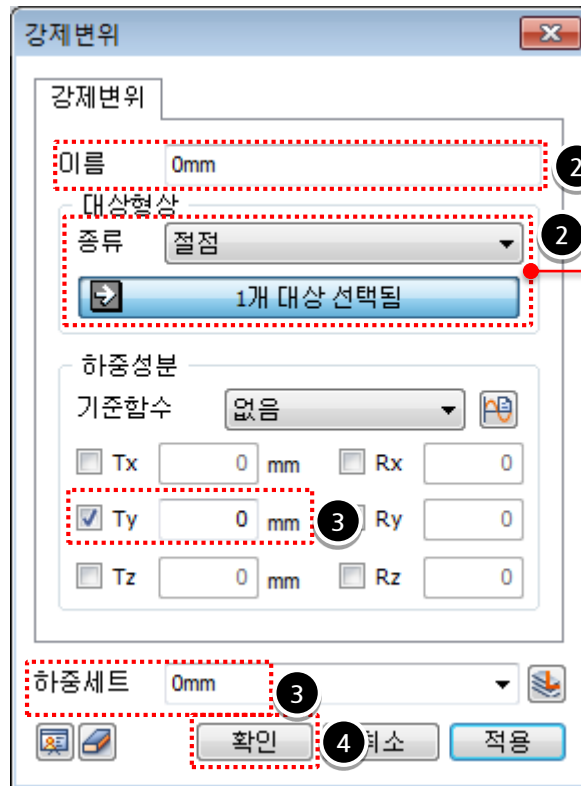
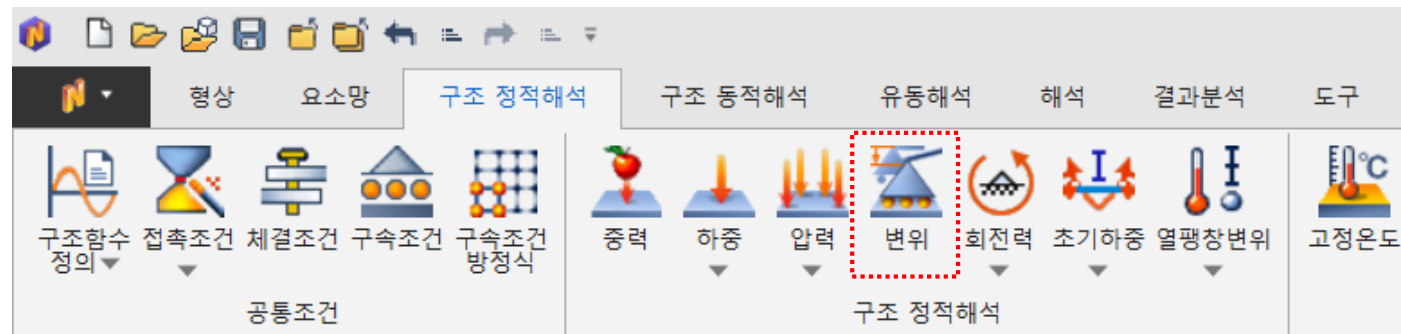
작업순서

1. [ (윗면) 클릭.

2. 강제변위 입력

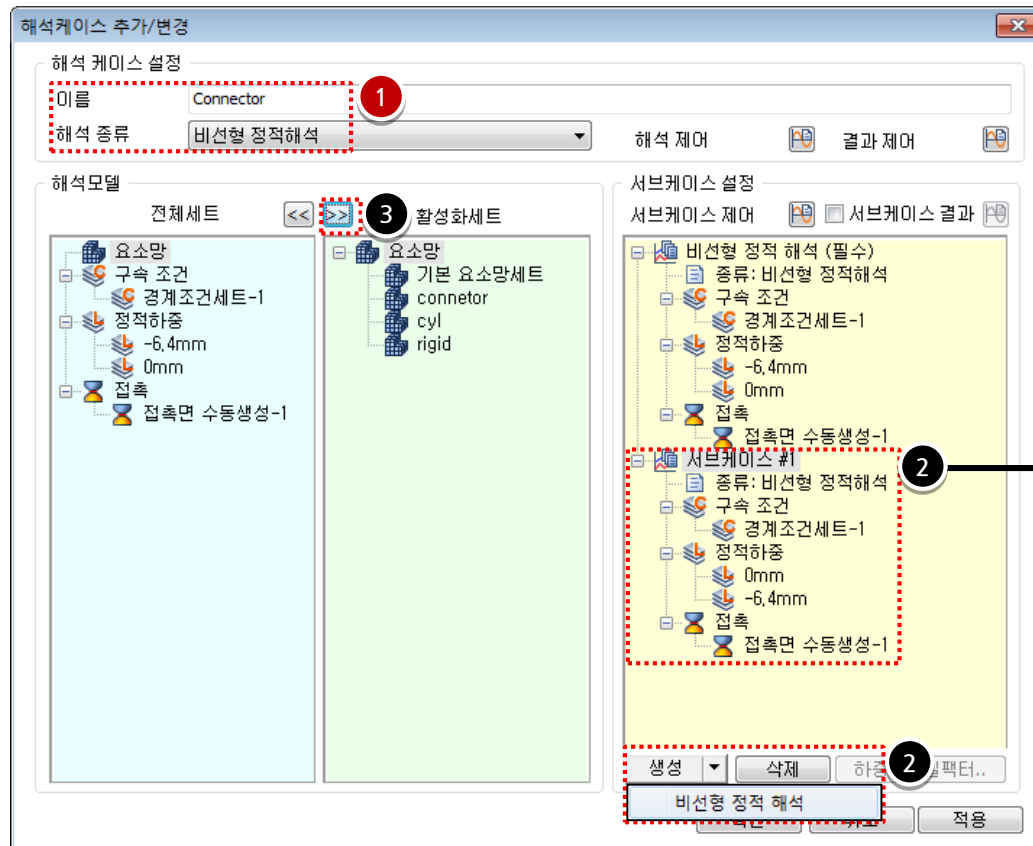
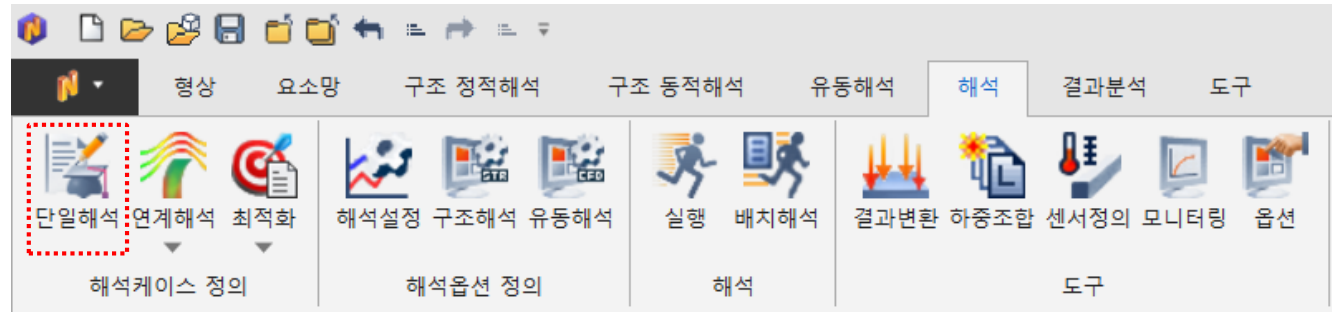
이름	0mm
대상종류	절점
대상선택	1개 선택
조건	Ty: 0 (mm)
하중세트	0mm

3. [확인] 버튼 클릭.



작업순서

- 이름: "Connector" 입력.
해석 종류: [비선형 정적해석] 선택.
- 서브케이스 설정 >> 생성 >> 비선형 정적해석 클릭.
- [>>] 버튼 클릭하여 모든 서브케이스에 구속조건, 하중조건을 활성화

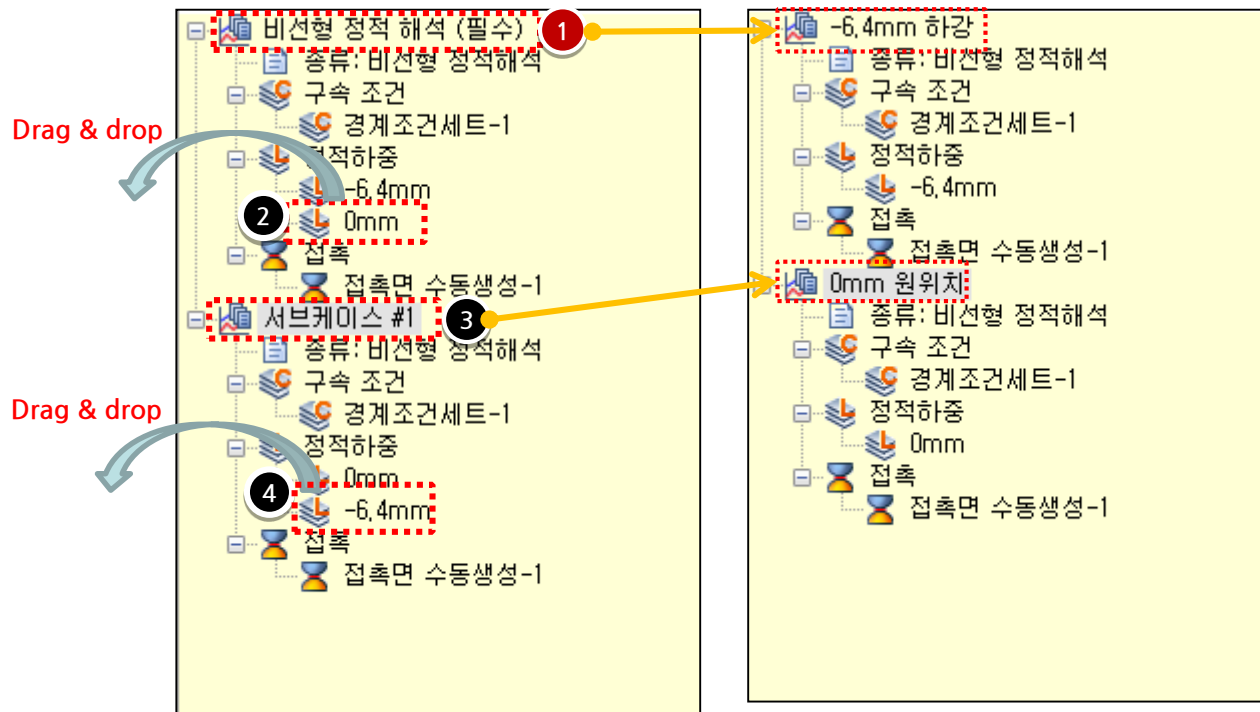


다음 페이지에서
계속 설명됩니다.

💡 서브케이스를 생성하여 서로 다른 하중조건을 적용합니다.


작업순서

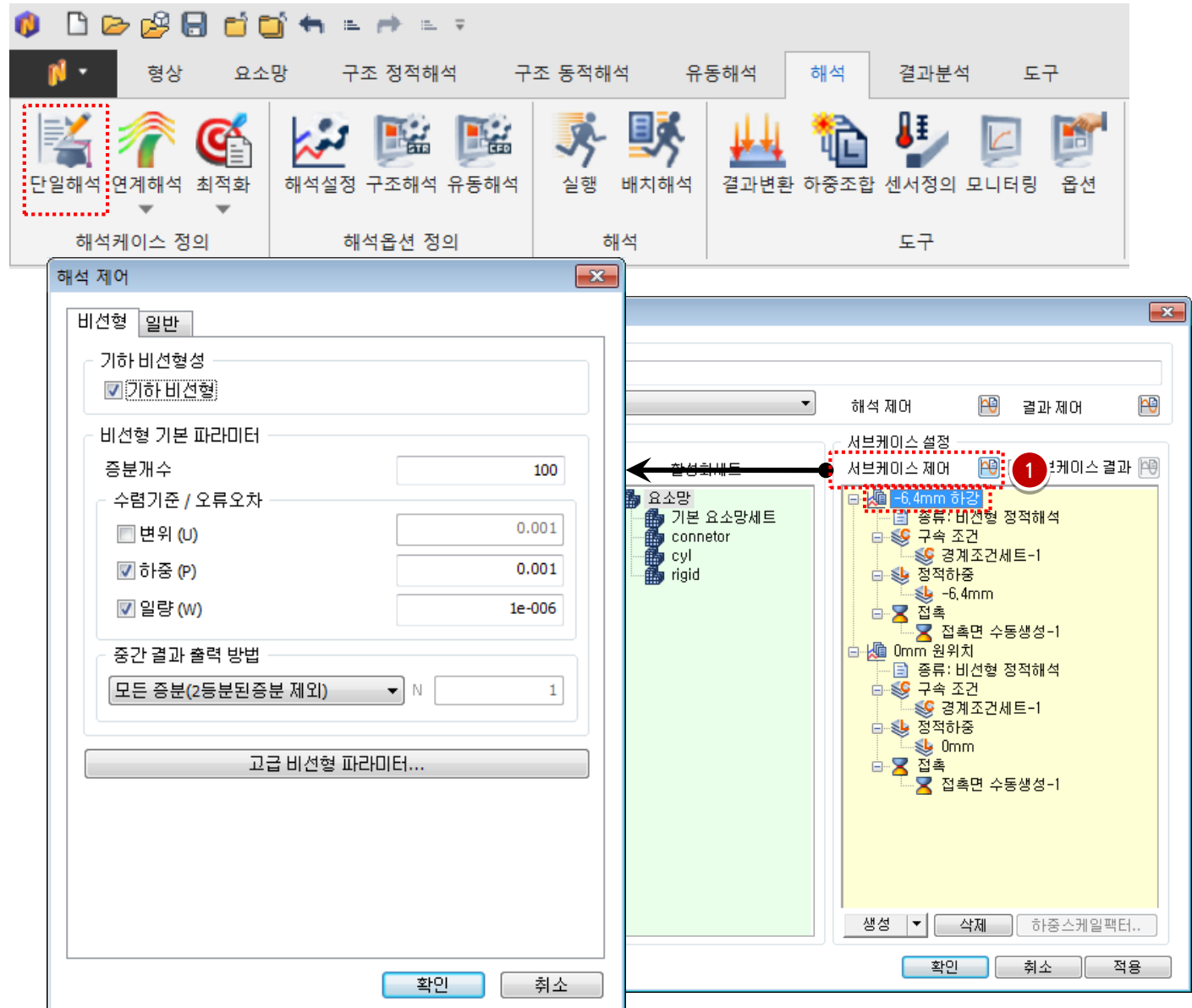
- 비선형 정적 해석 (필수) 클릭 후,
F2 버튼을 누르고
서브케이스 이름 : “-6.4mm 하강” 변경
- 6.4mm하강 서브케이스에서, 하중세트
중 “0mm” 를 전체세트로 drag&drop
- 서브케이스#1 클릭 후,
F2 버튼을 누르고
서브케이스 이름 : “0mm원위치” 변경
- 0mm원위치 서브케이스에서, 하중세트
“-6.4mm” 전체세트로 drag&drop



💡 서브케이스를 생성하여 서로 다른 하중조건을 적용합니다.

작업순서

1. “-6.4m 하강” 선택 후,
서브케이스 제어 [] 클릭.
2. “기하비선형” 체크
3. 증분개수 : “100” 입력
4. [확인] 버튼 클릭.




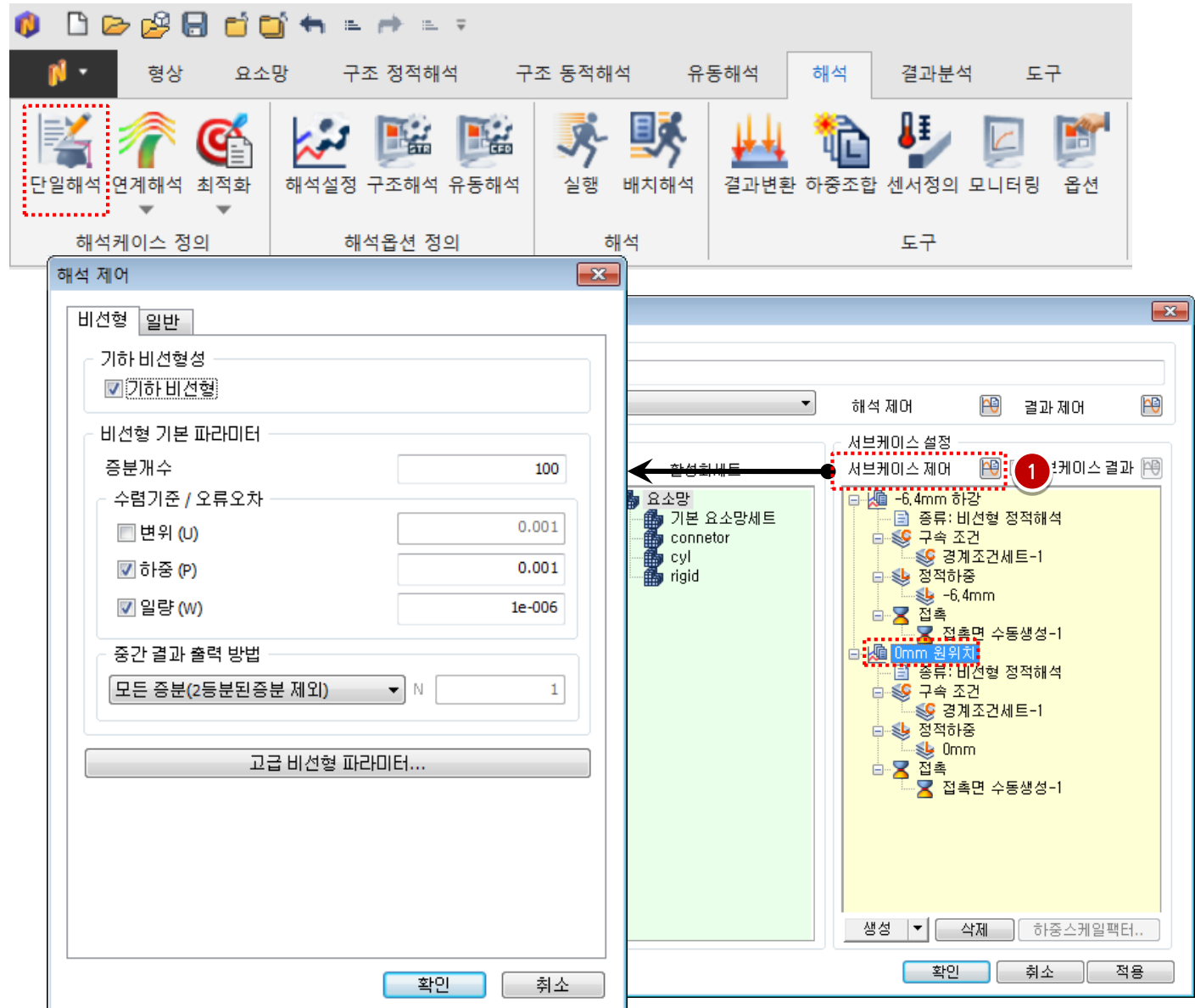
The screenshot displays the Midas NFX software interface. The top menu bar includes options like '형상', '요소망', '구조 정적해석', '구조 동적해석', '유동해석', '해석', '결과분석', and '도구'. The '해석' (Analysis) menu is active, showing sub-options like '단일해석', '연계해석', '최적화', '해석설정', '구조해석', '유동해석', '실행', '배치해석', '결과변환', '하중조합', '센서정의', '모니터링', and '옵션'.

The '해석 제어' (Analysis Control) dialog box is open, showing the '비선형 일반' (Nonlinear General) tab. The '기하비선형성' (Geometric Nonlinearity) section has the '기하비선형' (Geometric Nonlinearity) checkbox checked. The '증분개수' (Number of Increments) is set to 100. The '수렴기준 / 오류오차' (Convergence Criteria / Error) section has '하중 (P)' (Load) checked with a value of 0.001, and '일량 (W)' (Work) checked with a value of 1e-006. The '중간 결과 출력 방법' (Intermediate Result Output Method) is set to '모든 증분(2등분된 증분 제외)' (All increments (excluding 2-part increments)) with N=1.

The '서브케이스 제어' (Subcase Control) dialog box is also open, showing the '서브케이스 설정' (Subcase Settings) section. The '서브케이스 제어' (Subcase Control) checkbox is checked, and the '-6.4mm 하강' (6.4mm Downward) subcase is selected. The '결과' (Results) section shows the '서브케이스 결과' (Subcase Results) checkbox checked. The '확인' (OK) button is highlighted.

작업순서

1. “0mm 원위치” 선택 후,
서브케이스 제어 [] 클릭.
2. “기하비선형” 체크
3. 증분개수 : “100” 입력
4. [확인] 버튼 클릭.

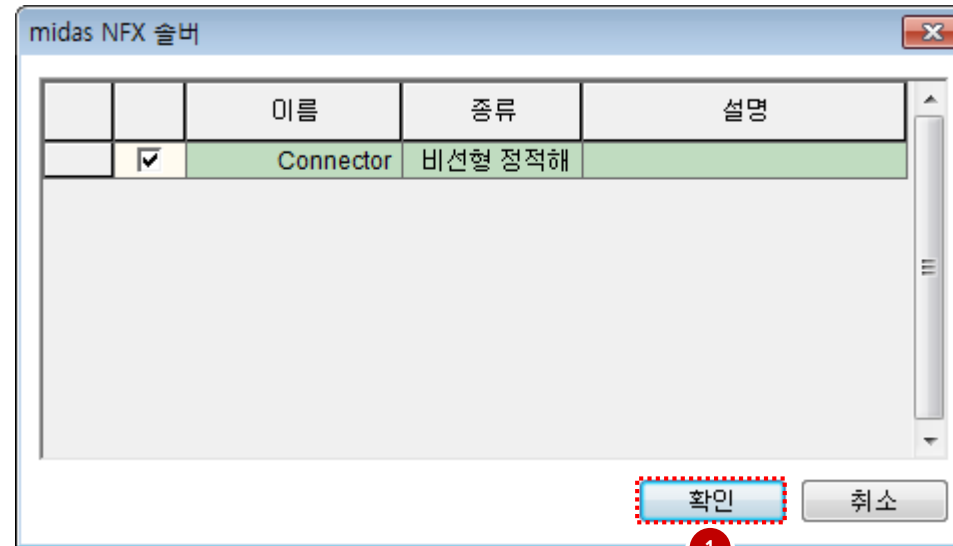


The screenshot displays the Midas NFX software interface. The main window shows the '해석' (Analysis) tab with various analysis options. A dialog box titled '해석 제어' (Analysis Control) is open, showing the '비선형 일반' (Nonlinear General) settings. The '기하비선형성' (Geometric Nonlinearity) section has the '기하비선형' (Geometric Nonlinearity) checkbox checked. The '증분개수' (Number of Increments) is set to 100. The '수렴기준 / 오류오차' (Convergence Criteria / Error) section has '하중 (P)' (Load) checked with a value of 0.001, and '일량 (W)' (Displacement) checked with a value of 1e-006. The '중간 결과 출력 방법' (Intermediate Result Output Method) is set to '모든 증분(2등분된 증분 제외)' (All increments (excluding 2-part increments)) with N=1. The '고급 비선형 파라미터...' (Advanced Nonlinear Parameters...) button is visible at the bottom of the dialog.

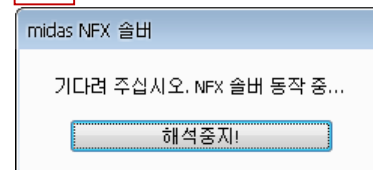
In the background, the '서브케이스 제어' (Subcase Control) panel is visible. The '서브케이스 설정' (Subcase Settings) section shows a tree view of subcases. The '0mm 원위치' (0mm Reference Position) subcase is highlighted with a red dashed box and a red circle with the number 1. An arrow points from this subcase to the '해석 제어' dialog box.

작업순서

1. [확인] 버튼 클릭.



💡 해석을 실행하면 midas NFX 슬버가 작동됩니다. [해석중지!] 버튼을 클릭하면 해석이 중지됩니다.



작업순서

1. 해석 및 결과 작업트리에서 전체 범위

더블 클릭.

2. 해석 및 결과 >> 일반 >> 실제스케일

변경

3. [] (멀티-스텝 애니메이션 녹화) 클릭.


4. [] (ooooo) 클릭.

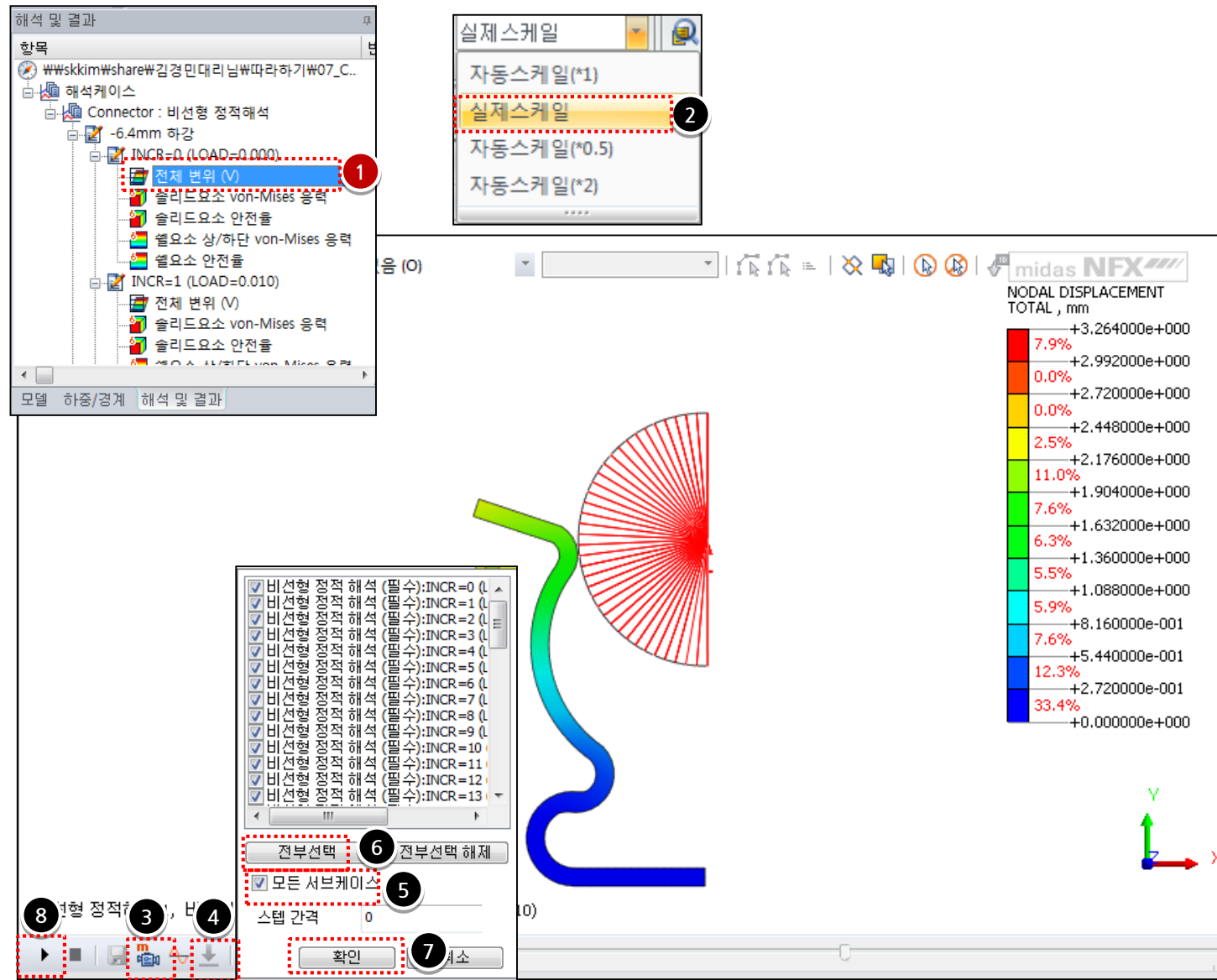
5. “모든 서브케이스” 체크

6. 전부선택 클릭

7. [확인] 버튼 클릭

8. [] (재생) 클릭.

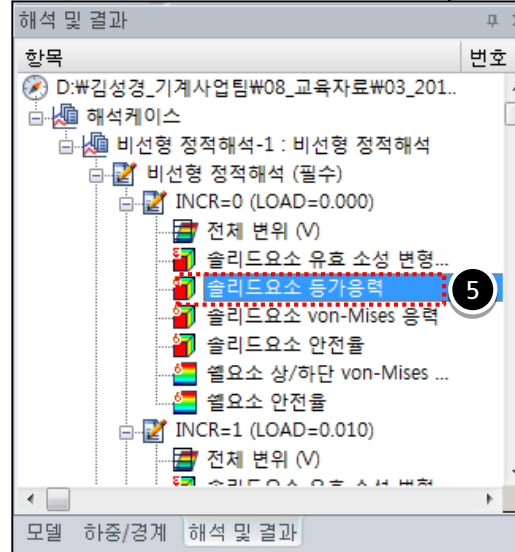
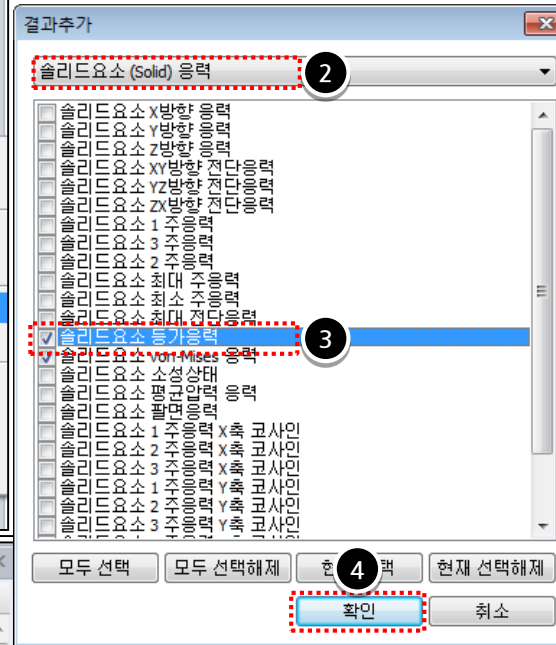
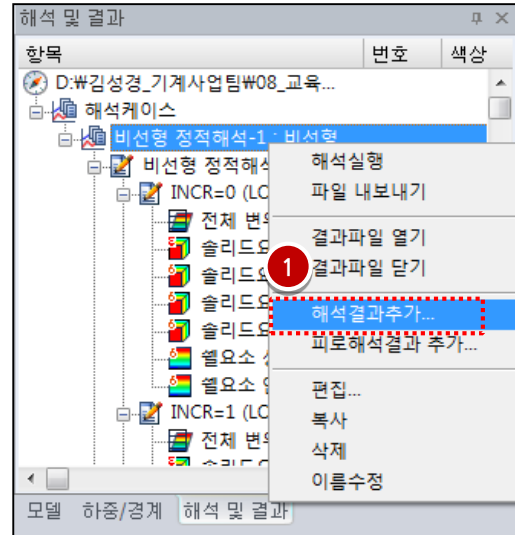
 멀티-스텝 애니메이션 녹화를 이용하면 스텝별 결과를 애니메이션으로 확인할 수 있습니다. (자동으로 전체 스텝 결과에 체크되어 있습니다.) 애니메이션 결과 확인이 끝나면 [] 버튼을 클릭하여 애니메이션 재생을 종료해 주어야 합니다. 이는 다른 후처리 작업시 발생할 수 있는 조작의 불편함을 최소화하기 위한 작업입니다.



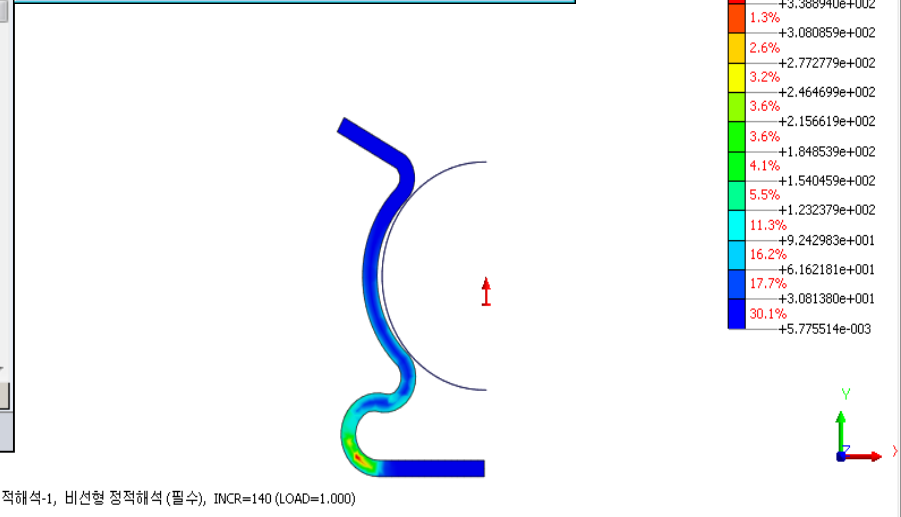
The screenshot displays the midas NFX interface during a non-linear static analysis. The analysis tree on the left shows the selected case: Connector : 비선형 정적해석 > INCR=0 (LOAD=0.000) > 전체 범위 (V). A red dashed box highlights this selection, labeled '1'. The '실제스케일' (Actual Scale) dialog box is open, with '실제스케일' selected, labeled '2'. The animation control panel at the bottom shows the '모든 서브케이스' (All Subcases) checkbox checked, labeled '5', and the '전부선택' (Select All) button highlighted, labeled '6'. The '확인' (OK) button is labeled '7', and the '재생' (Play) button is labeled '8'. The main window shows a 3D model of a curved beam with a fan-shaped displacement field, and a legend on the right titled 'MODAL DISPLACEMENT TOTAL, mm' with a color scale from 0.0% to 33.4%.

작업순서

1. 해석 및 결과 작업트리에서 비선형정적 해석(필수) 우클릭 후, [해석결과추가..] 클릭.
2. [솔리드요소 (Solid)응력] 선택
3. 솔리드요소 등가 응력 체크
4. [확인] 버튼 클릭.
5. INCR=140 (LOAD=1.000) >> [솔리드요소 등가 응력] 더블 클릭



💡 탄소성 재료의 응력결과는 von-mises 응력이 아닌 등가응력 응력을 확인해야 합니다.



비선형 정적해석-1, 비선형 정적해석(필수), INCR=140 (LOAD=1.000)

비선형 해석을 위한 방법론

주요 활용 팁

① 비선형 해석 실행 전, 선형 해석의 사전 실행

- 선형 해석을 통하여 비선형의 정도가 심하지 않은 경우에는 비선형 해석 필요 여부 판단
- 선형 해석을 통하여 너무 과도한 응력이나 변형 발생시 제품 설계를 개선
- 선형 해석을 통하여 제품의 응력과 변형을 사전에 검토하여 높은 응력 변화가 예상이 되는 부분에는 요소망을 미리 세밀화
- 선형 해석을 통하여 접촉이 예상되는 부분 최소화 하여 최소한의 접촉 영역 설정

② 비선형 해석에 필요한 매개 변수 설정

- 하중 증분수는 가장 중요한 매개 변수 중 하나이며, 초기 하중 증분값에서 소성 영역으로 바로 도달하거나 과도한 결과값이 나오지 않게 설정(수렴이 잘 되지 않을 수 있다.)
- 수렴 오차 기준 선택, 기하비선형 옵션 설정, 선탐색 기법 활용, 서브케이스 활용, 접촉파라미터 수정
- 리스타트 기법 적극 사용(수렴 관련 매개 변수들을 조정하여 바로 적용 가능하므로 많은 시간 절약 가능)
- 일반적인 비선형(기하, 접촉, 재료)외의 특수한 비선형 해석의 이해
 - 예 1) 고무 재료의 거동 특성을 파악하기 위해서는 초탄성 재료 선택
 - 예 2) 비선형 좌굴해석을 하는 경우에는 호장법(Arc-length) 사용

주요 활용 팁

③ 비선형 해석을 위한 유한요소 모델링

적절한 해석 모델을 생성하면 해석 속도와 수렴성이 크게 높아지며, 선형 해석에 비하여 비선형 해석이 시간이 오래 걸리기 때문에 결과에 영향을 주지 않는 한도 내에서 모델을 가능한 단순화 시켜야 한다. 그러므로 비선형 해석을 위한 해석 모델을 생성할 때 다음 사항들을 고려해야 한다.

1) 가능한 대칭성을 활용한다.

→ 비선형 좌굴 문제 또는 동해석에서는 사용하면 안된다.

2) 가능한 보 또는 셸, 평면 이상화를 적용한다.

3) 재료 비선형 모델의 사용을 최소화한다.

→ 소성이 예상되는 영역에만 재료 비선형 요소를 사용한다.

4) 변형률이 높은 영역의 요소망은 조밀하고 부드럽게 한다.

→ 접촉영역에서는 요소망을 더욱 조밀하게 한다.

→ 대변형이 예상되는 부분에서는 결과에서 이상적인 요소의 형태가 나오도록 생성한다.

5) 가능하면 회전이나 추출을 이용하여 육면체나 오면체 요소를 생성한다.

→ 사면체 요소망보다 적은 수의 요소로 보다 정확한 해를 구할 수 있다.

6) 요소의 퀄리티(종횡비, 뒤틀림 등)가 좋지 않은 부분은 수렴 문제가 발생할 수 있으므로 주의한다.

→ 필렛, 작은 구멍 등 해석 결과에 중요한 영향을 미치지 않는 부분은 제거한다.