

Joint Stiffness 해석

Computational Design Laboratory
Department of Automotive Engineering
Hanyang University, Seoul, Korea



한양대학교
HANYANG UNIVERSITY

CDL Computational
Design
Lab

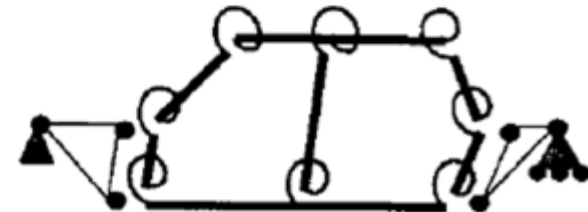
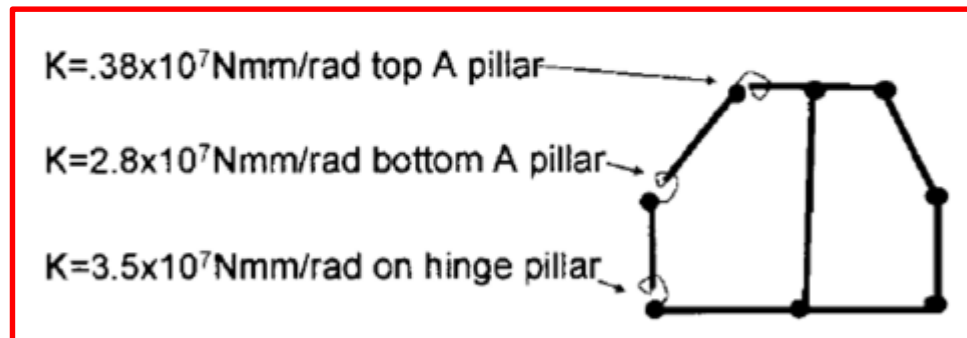
목차

- 예제 문제
 - Joint stiffness analysis
- 해석 프로세스
 - 기하형상 생성
 - 재료 물성 및 특성 입력
 - 요소망 생성
 - 구속조건 설정
 - 하중조건 설정
 - 해석케이스 정의 및 해석 실행
 - 후처리

예제: JOINT STIFFNESS (1)

How to calculate rotational joint stiffness?

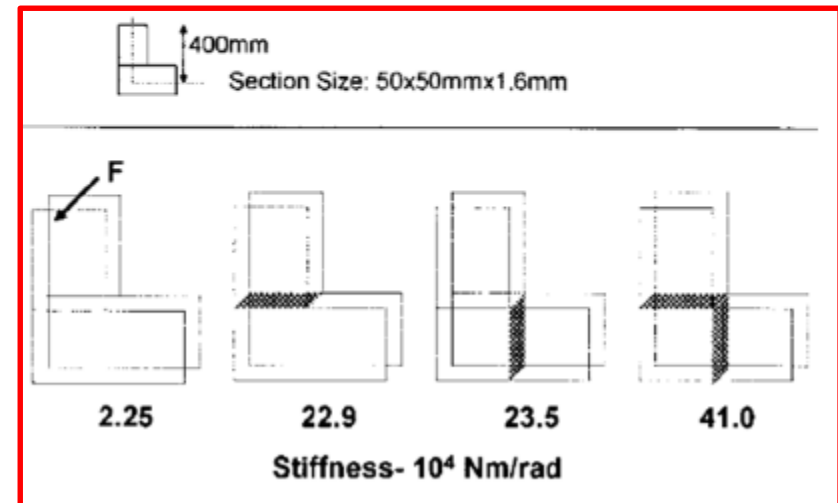
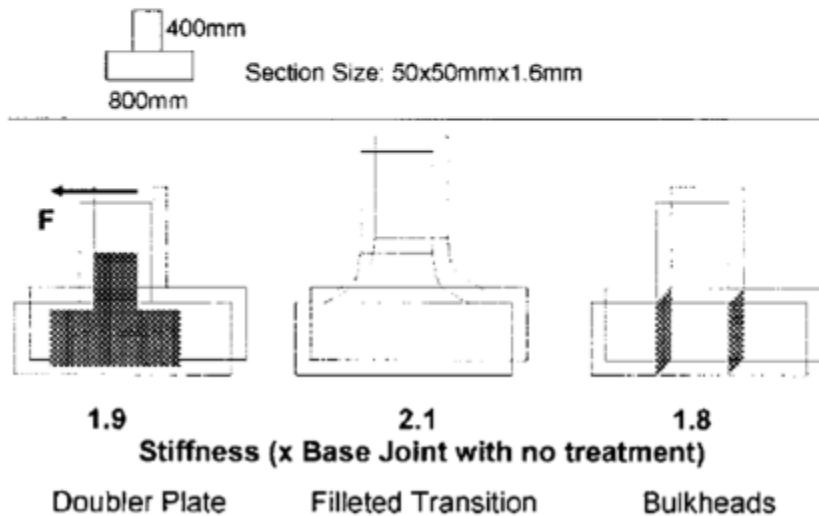
- $F = 6680 \text{ N} \rightarrow \delta = 6.4 \text{ mm}$
 - $K = 1044 \text{ N/mm}$ per side = 2088 N/mm bending stiffness
 - 30% of 7000 N/mm target
 - Twice the actual stiffness: too stiff ?
- Modified model with flexible joints



- $F = 6680 \text{ N} \rightarrow \delta = 7.7 \text{ mm}$
 - $K = 1735 \text{ N/mm}$ bending stiffness

예제: JOINT STIFFNESS (2)

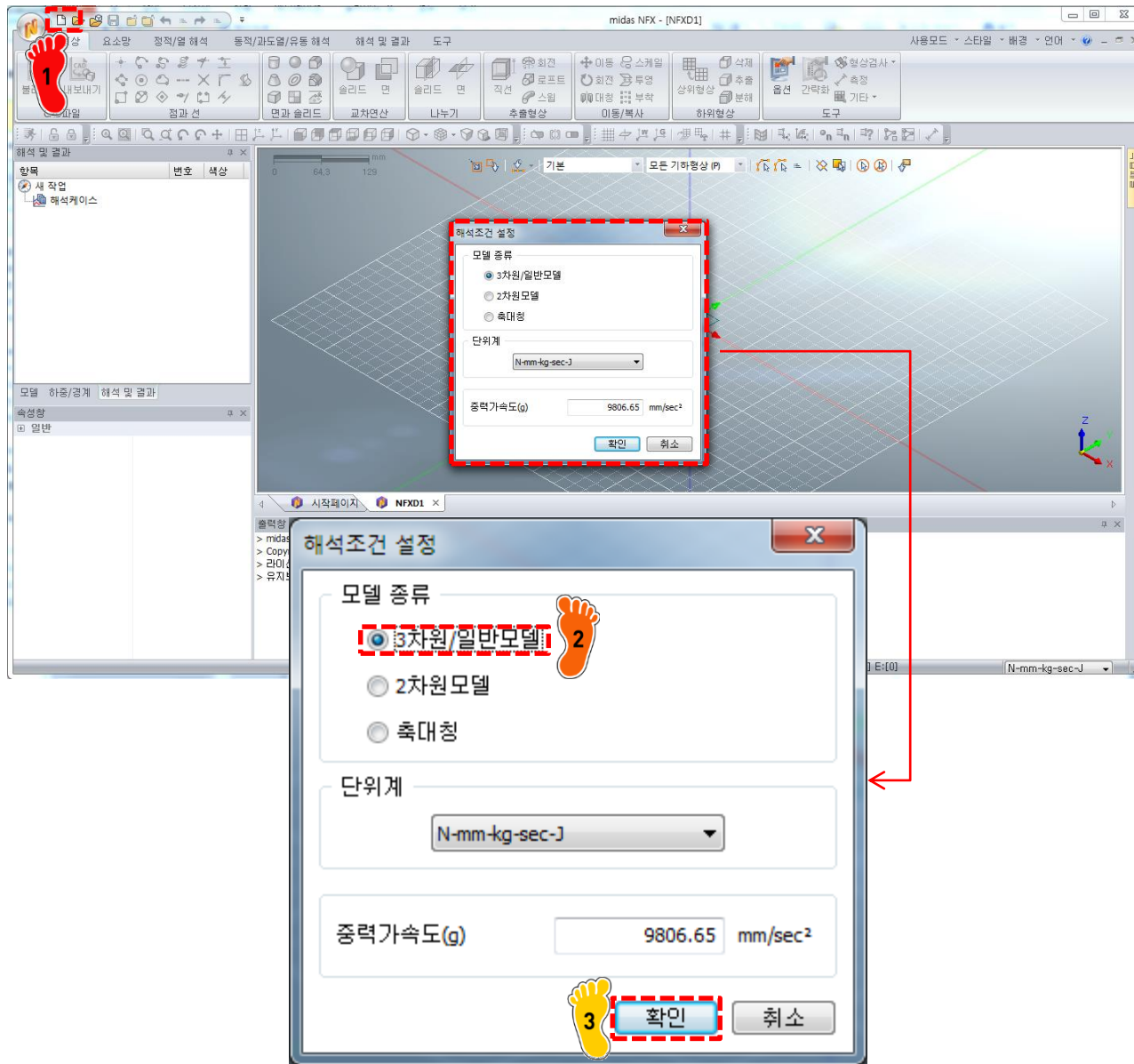
- Joint rigidity in-plane bending
 - Mass penalty
 - Additional load path
- Effect of added bulkhead on out-of-plane joint rigidity



JOINT STIFFNESS

셸 요소

기하형상 생성 (1)

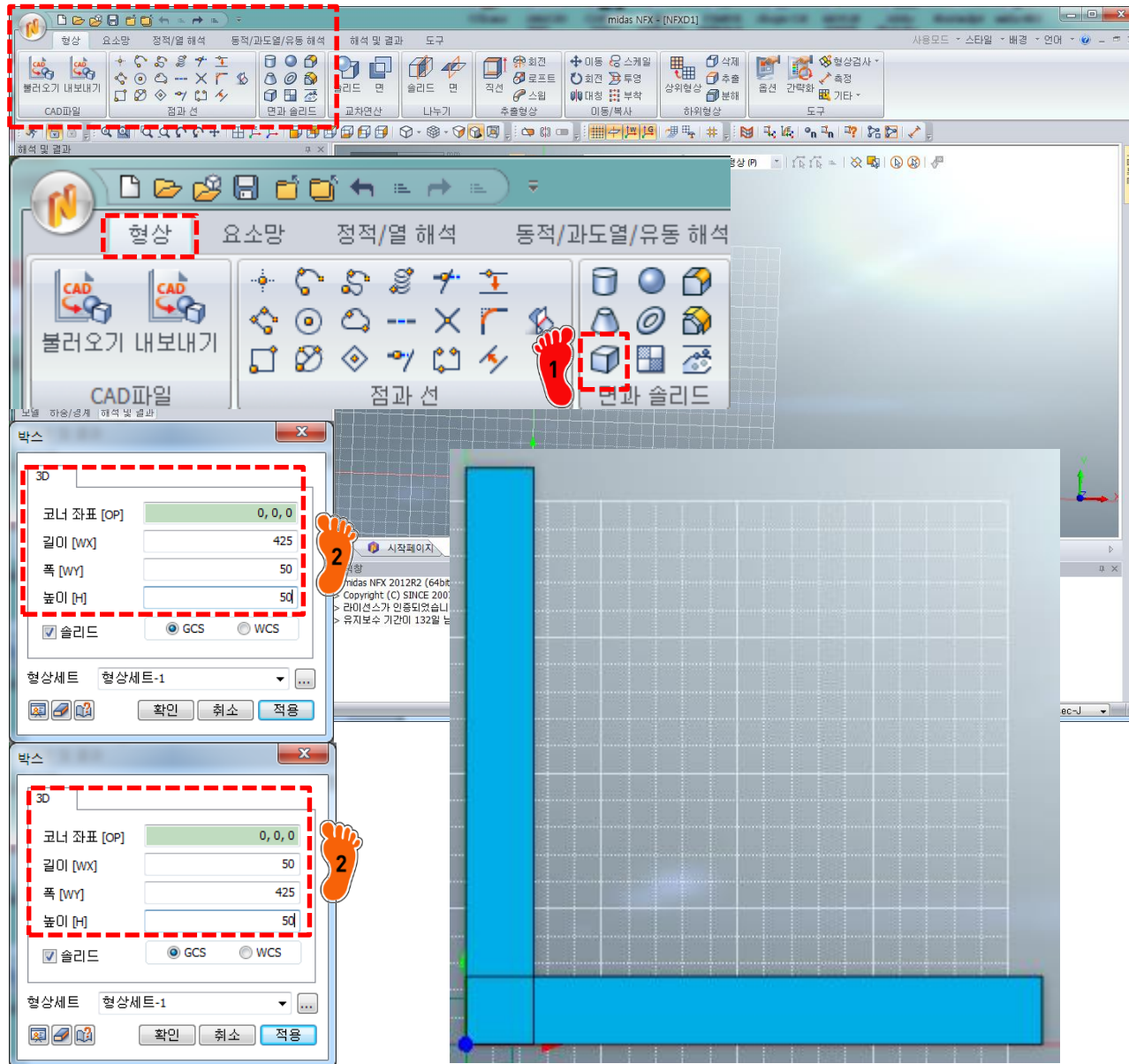


1 새로 만들기 클릭

2 3차원/일반모델 선택

3 확인

기하형상 생성 (2)



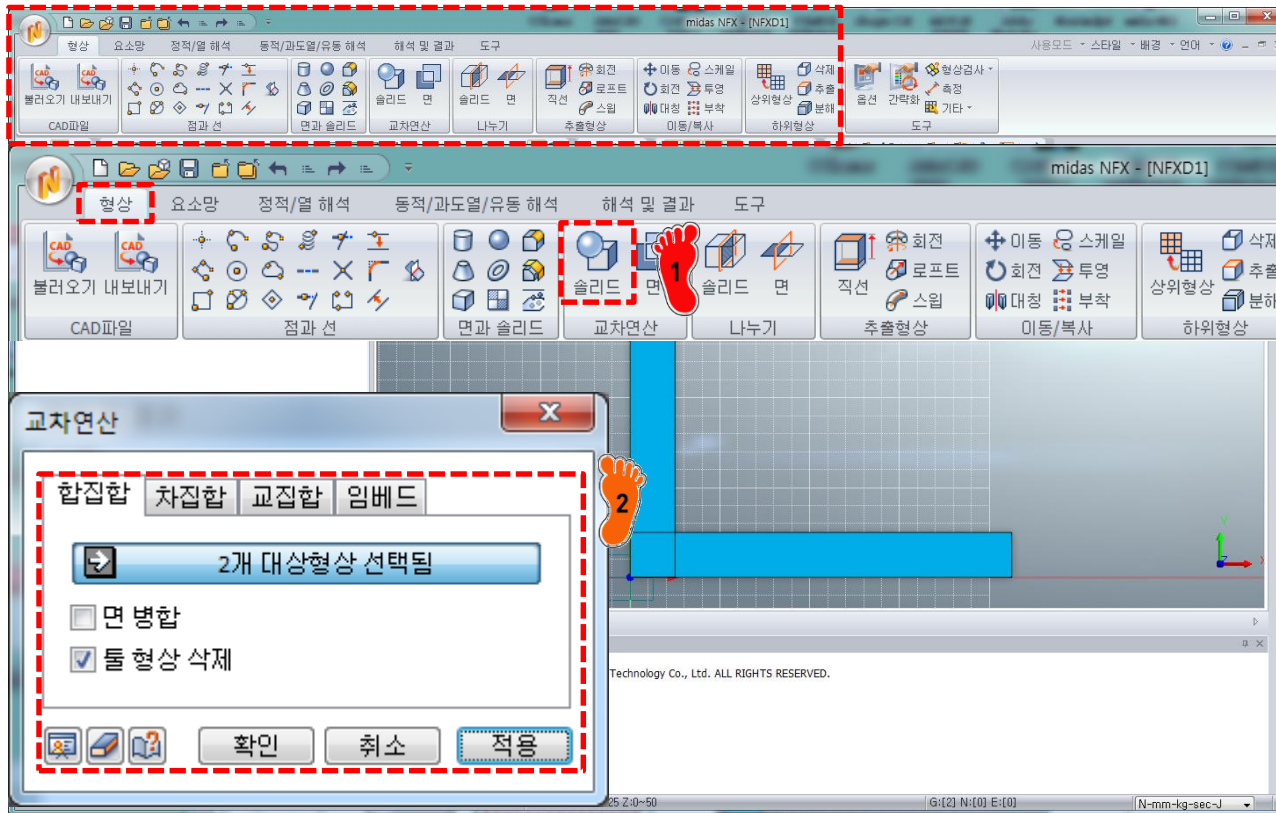
1 형상 탭 메뉴에서 면과 솔리드 메뉴의 박스 클릭

2 코너좌표 (0,0,0)
WX: 425
WY: 50
WZ: 50

코너좌표 (0,0,0)
WX: 50
WY: 425
WZ: 50

인 두 개의 박스 생성

기하형상 생성 (3)



1 형상 탭 메뉴에서 교차연산 메뉴의 솔리드 클릭

2 합집합으로 면 병합 체크 해제 상태에서 적용

재료 물성 및 특성 입력



두께 1.6 mm 인 판 특성 생성

재료는 Alloy Steel 로 입력

2차원 특성 생성/변경

복합재료 셀 2D 그리기전용 2D 유동해석

판 막 면 평면변형률 축대칭

번호 1 이름 2차원 특성 색상 [색상선택기]

재료 1: Alloy Steel [재료선택기]

재료좌표계

☒ 좌표계 전체직교좌표계

☐ 각도 0 [도]

두께

☒ 균일두께

기준합수 없음 [기준합수선택기]

T / T1 1.6 mm T2 1 mm

T3 1 mm T4 1 mm

비구조질량 0 kg/mm²

☐ 면내회전자유도 포함

옵션...

확인 취소 적용

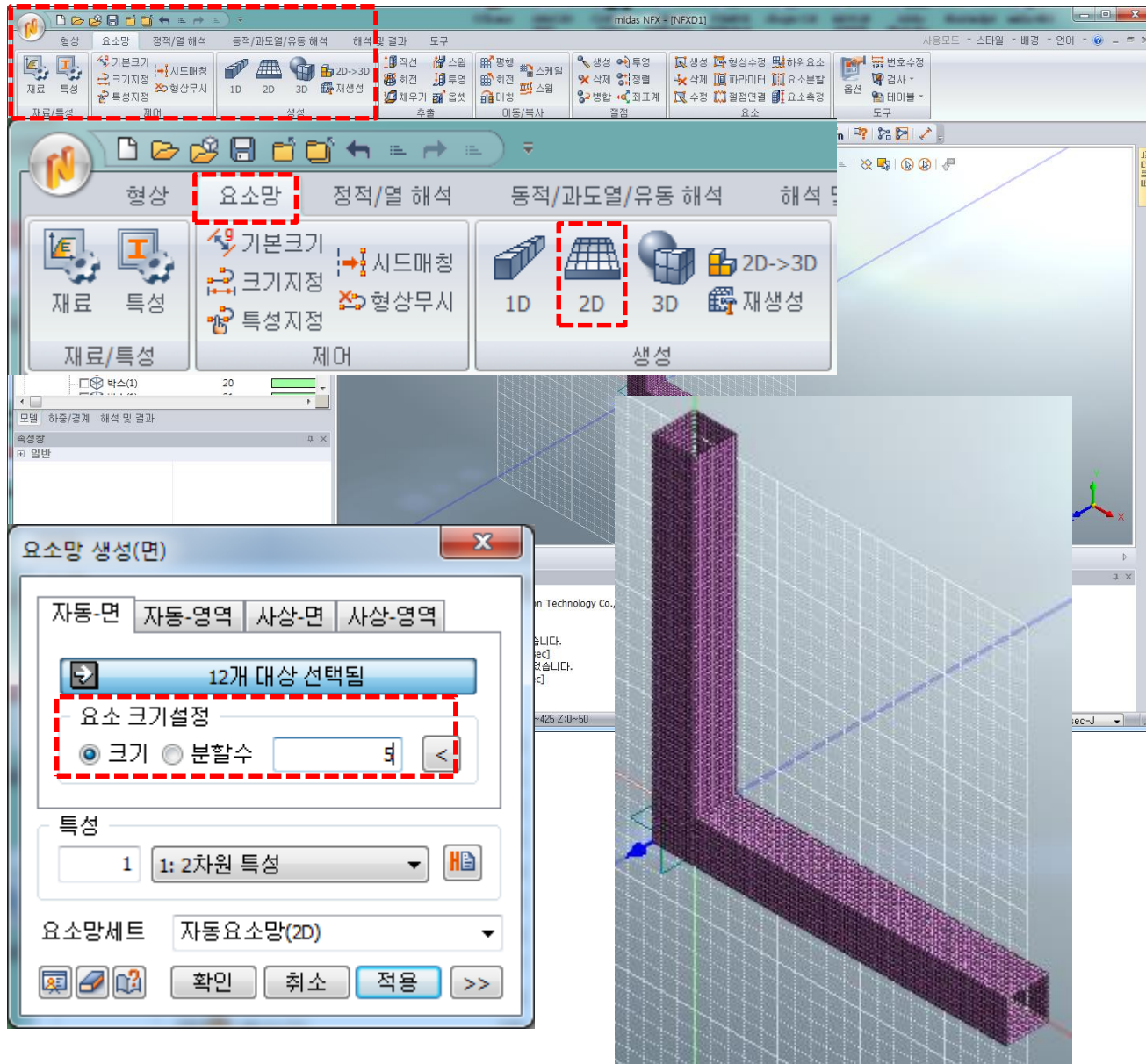
특성 추가/수정

번호	이름	종류	하위종류
1	2차원 특성	2D	판

[생성] [수정...] [복사] [삭제]

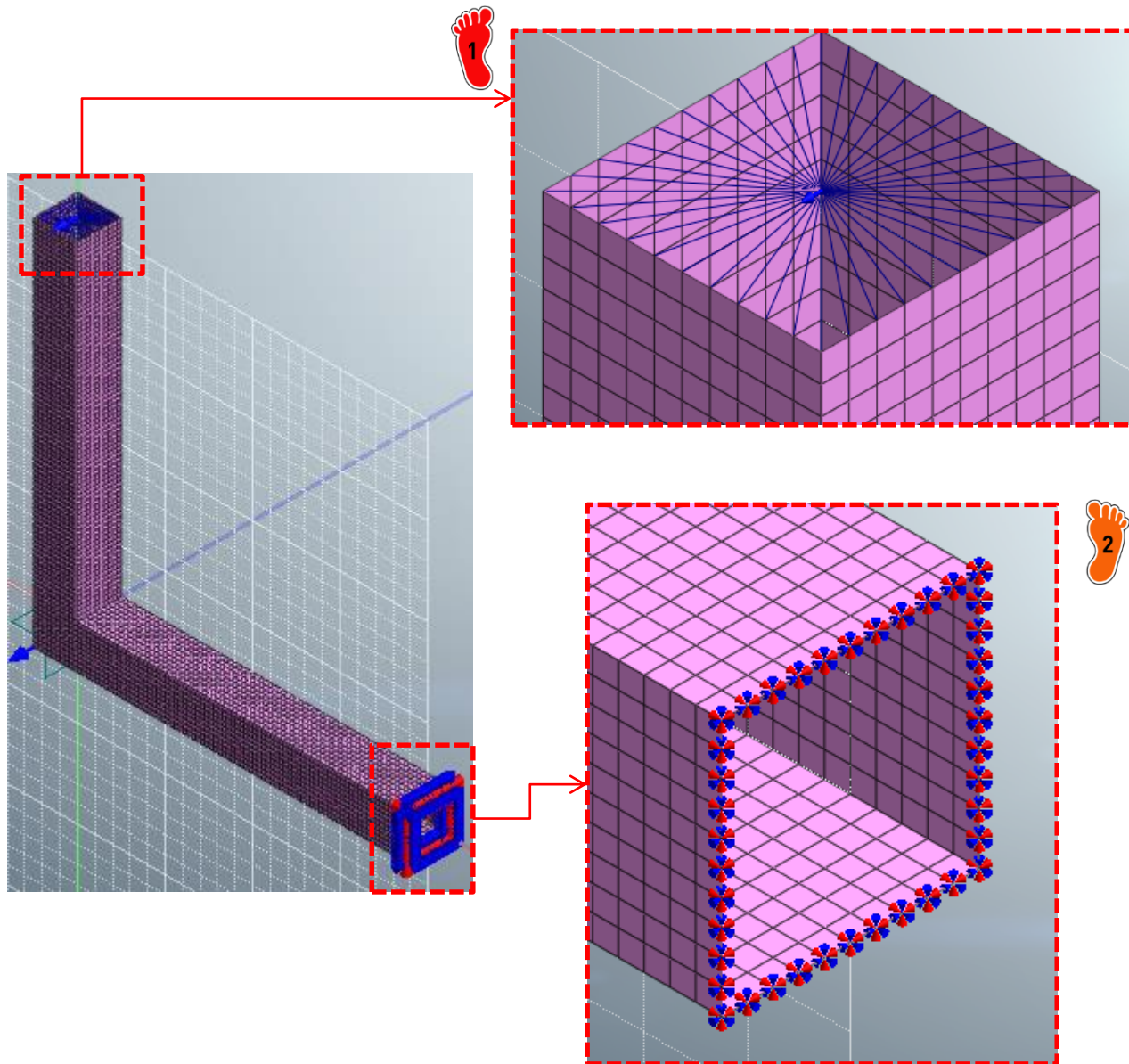
닫기

요소망 생성



1 최 외곽 면들을 이용하여 요소 크기 5인 요소망 생성

구속조건 및 하중조건 설정

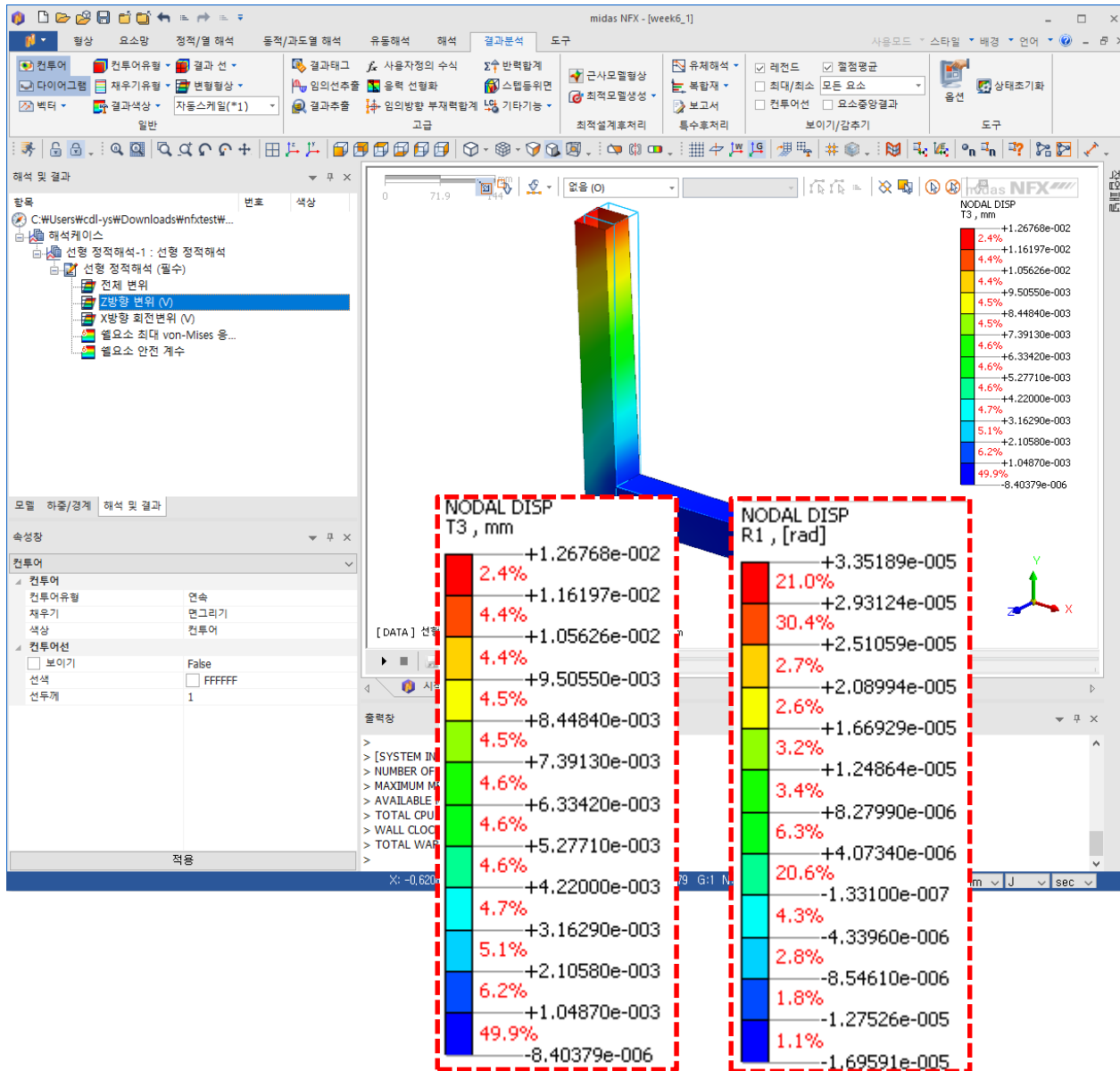


1 리모트 하중을 이용하여 (좌표지정) 평면에 수직한 방향으로 단위하중(1N) 입력

2 고정구속으로 구속조건 설정

3 선형 정적해석 수행

해석 결과

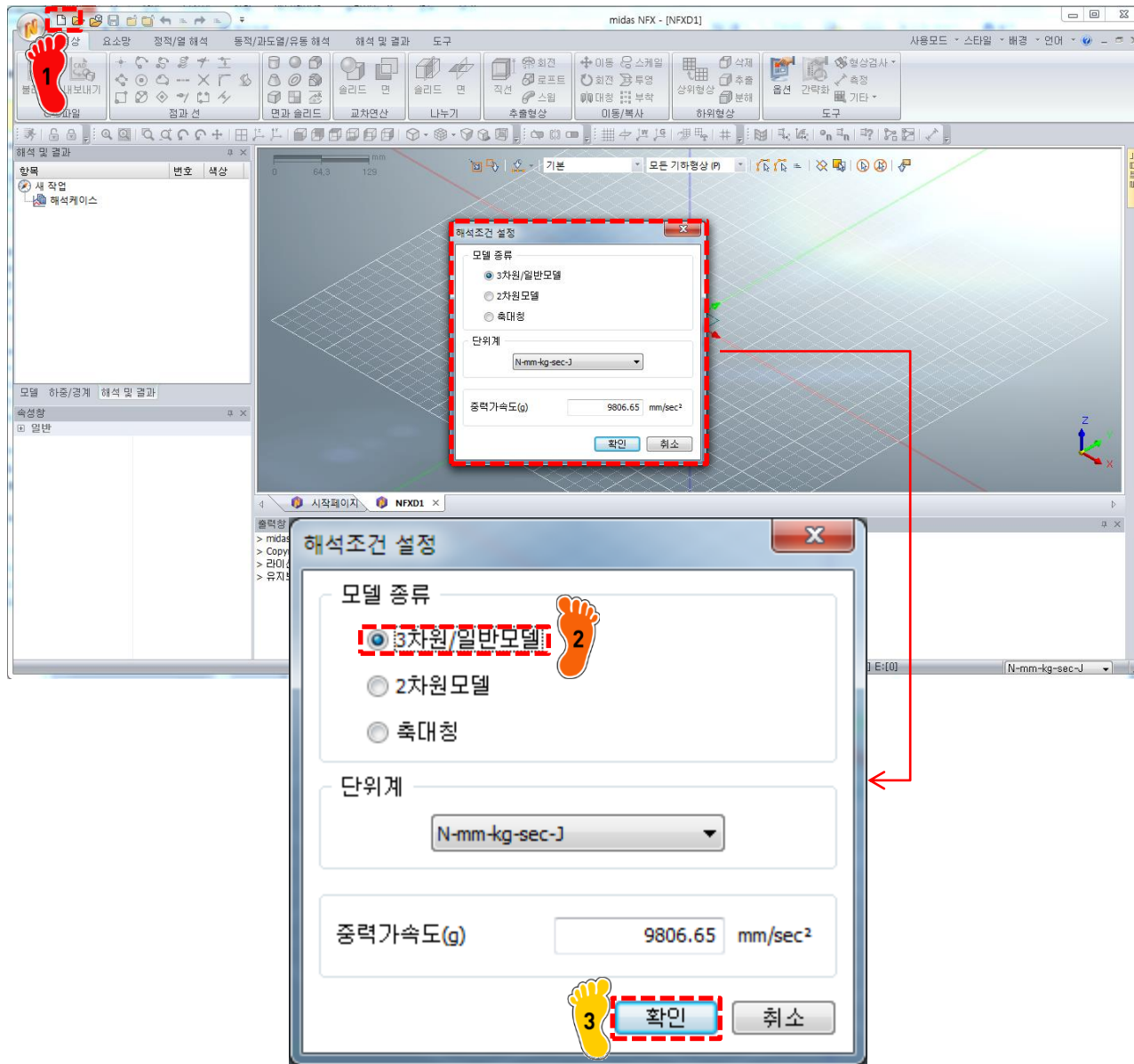


하중 방향 최대 변위는
1.27e-2 mm, 최대 회전은
3.35e-5 rad 확인

JOINT STIFFNESS

빔 요소

기하형상 생성 (1)

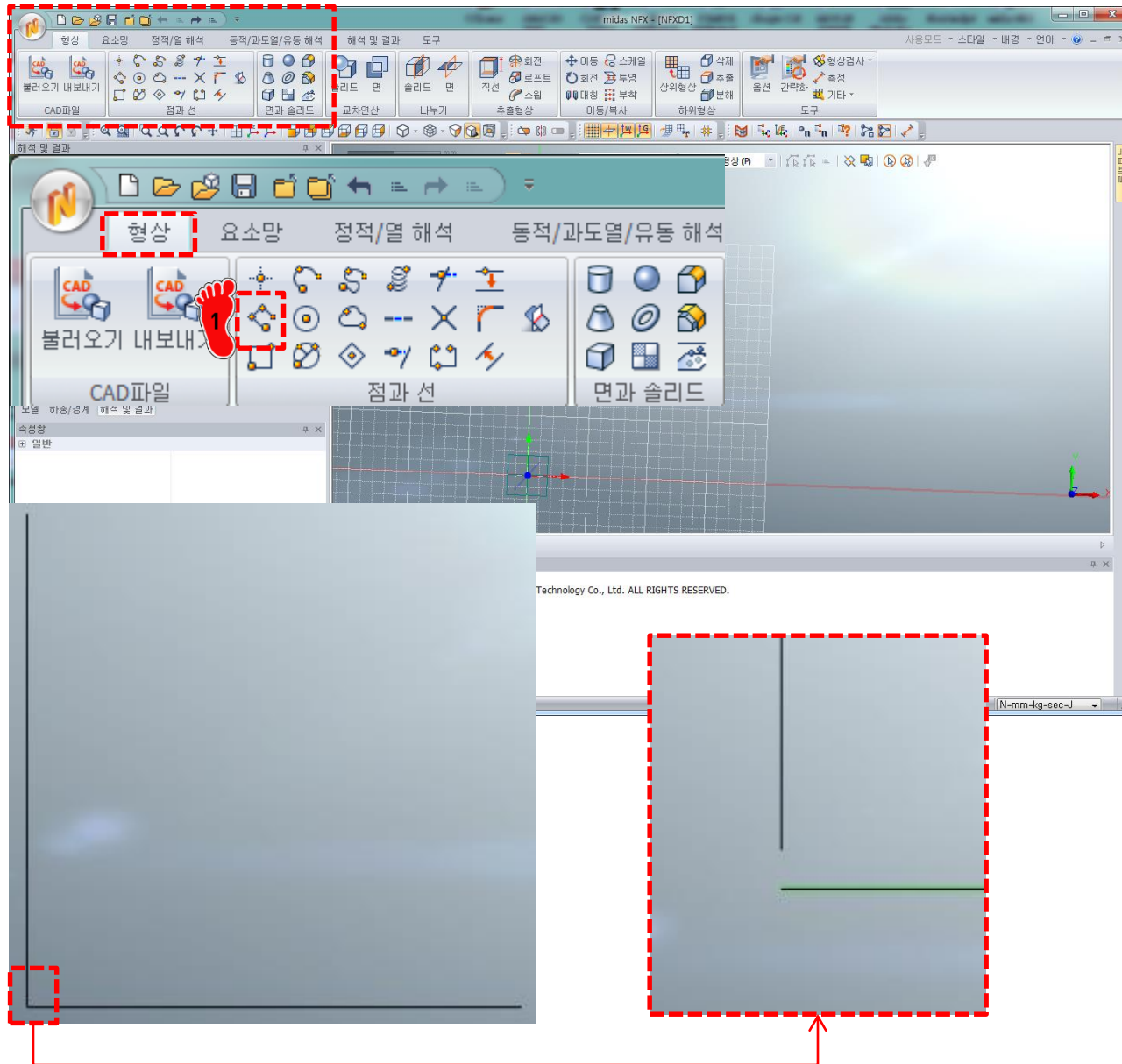


1 새로 만들기 클릭

2 3차원/일반모델 선택

3 확인

기하형상 생성 (2)



1 형상 탭 메뉴에서 점과 선 메뉴의 연결선을 이용하여 가로 세로 400 mm 인 L자 형상을 생성

스프링을 부착할 부분을 0.5 mm 정도로 떨어트림

재료 물성 및 특성 입력



예제에서 주어진 단면 특성을 갖는 1차원 특성 생성

재료는 Alloy Steel 로 지정

단면템플릿

Box

DIM1 50 mm
DIM2 50 mm
DIM3 1.6 mm
DIM4 1.6 mm

절점에서 전단중심의 거리

DY 0 mm
DZ 0 mm

< 전단중심 >

확인 취소

1차원 특성 생성/변경

로드 바 파이프 1D 그리기전용

번호 1 이름 1차원 특성 색상

재료 1: Alloy Steel

단면적 309.76 mm²

단면2차모멘트
I1 121070.729 I2 121070.729 I12 0
단위: mm⁴

비틀림상수 184358.349 mm⁴
비틀림응력계수 0 mm
길이당 비구조질량 0 kg/mm

전단면적계수
K1 0.423474147 K2 0.423492362

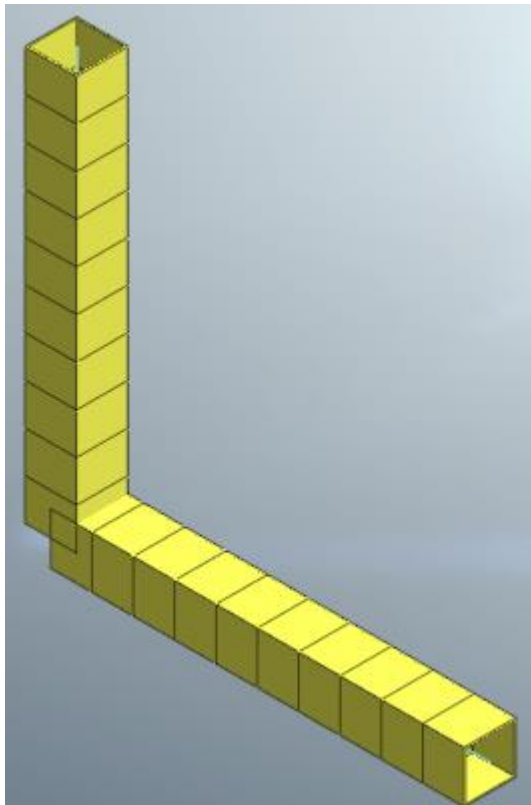
전단중심에서 중립축까지의 거리
Y 0 mm Z 0 mm

응력계산위치...

단면 속성
☐ 재료 정보 고려하여 단면 속성을 계산
☒ 단면형상... Box

확인 취소 적용

요소망 생성



요소 생성/삭제

1D 2D 3D 기타 삭제

부위

요소 번호 21

종류와 연결정보

☒ 2절점 ☒ [12...] ☐ [11...]

☐ 그라운드 ? 절점을 선택하세요

방향 (요소 y축)

☐ 참조 절점 ? 절점을 선택하세요

☐ 참조 방향 ? 방향벡터성분

☒ 좌표계 전체 직교좌표계

☐ 직접입력 0, 0, 1

스프링/댐퍼 위치

☒ 비율 0.5

☐ 옵션 전체 직교좌표계

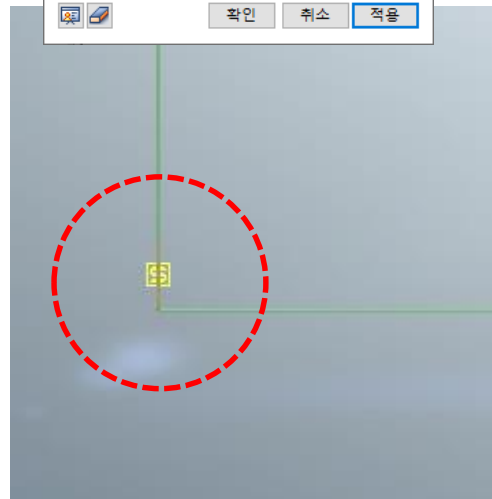
(S1,S2,S3) 0, 0, 0 mm

특성

2: 기타 특성

요소망세트 부위

확인 취소 적용



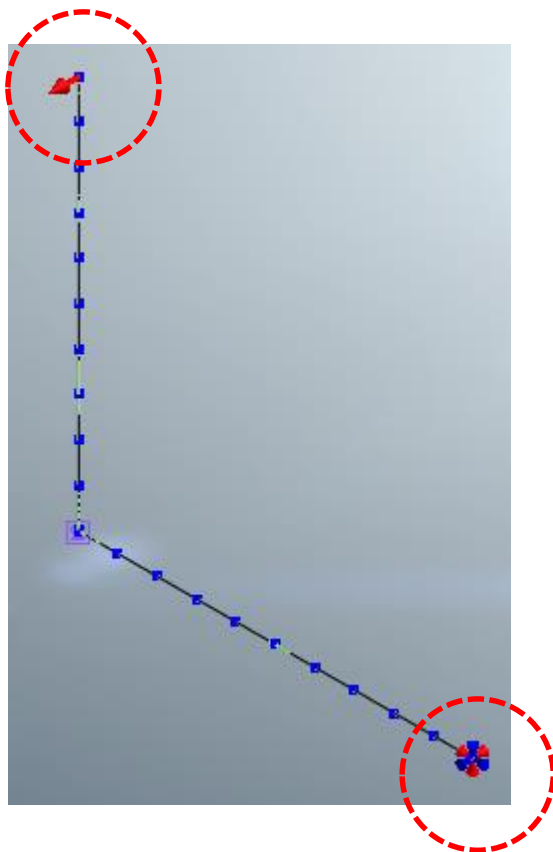
1D 요소망 생성



연결부위에 각 자유도에 맞는 스프링 6개 생성 또는 부위 요소 1개 생성

강성 값은 1e10 으로 입력

구속조건 및 하중조건 설정



예제와 동일하게 구속 조건
및 하중 조건 설정

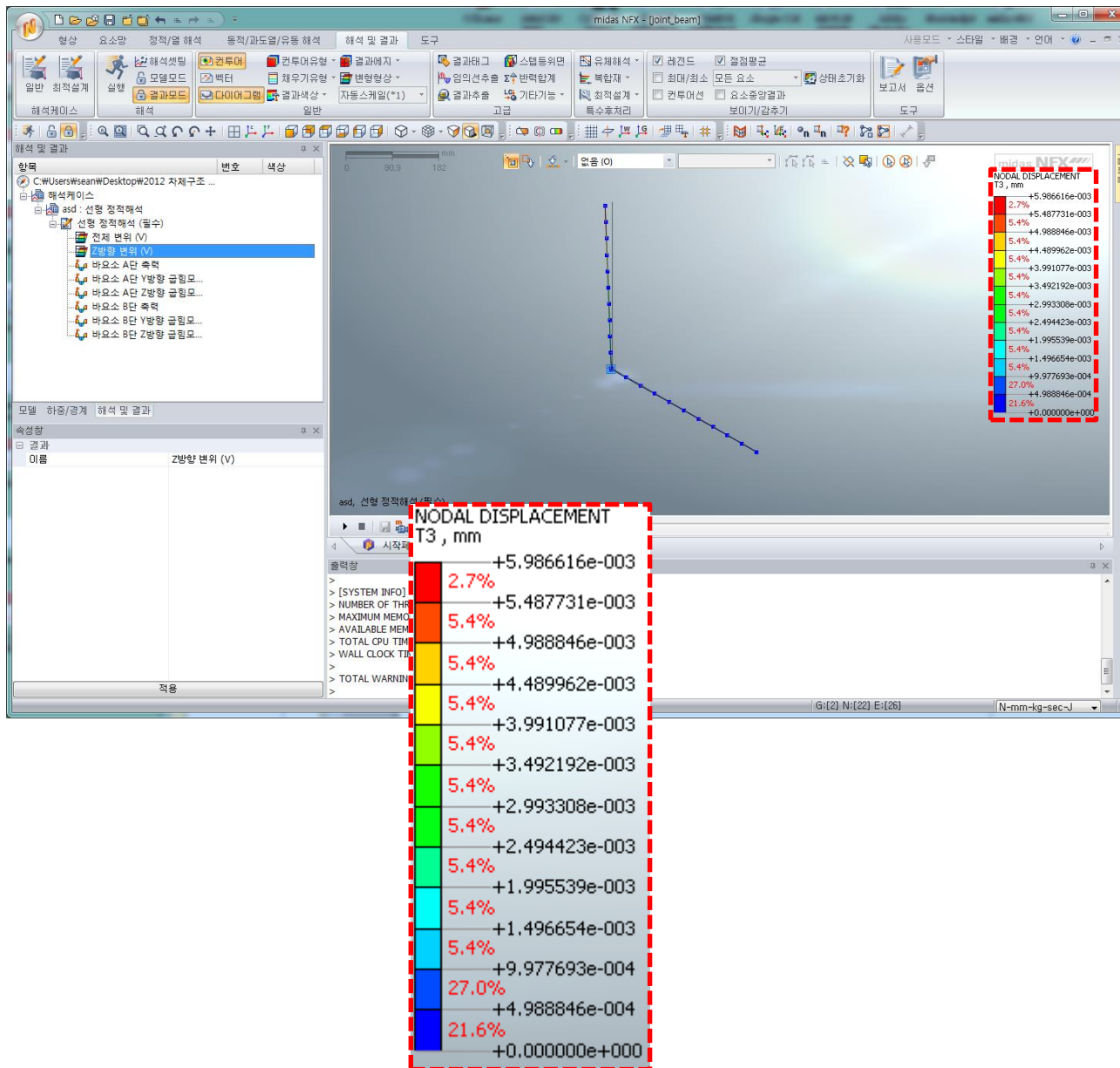
구속 조건은 고정 구속
하중 조건은 면외 방향으로
단위하중

입력



선형정적해석 수행

해석 결과

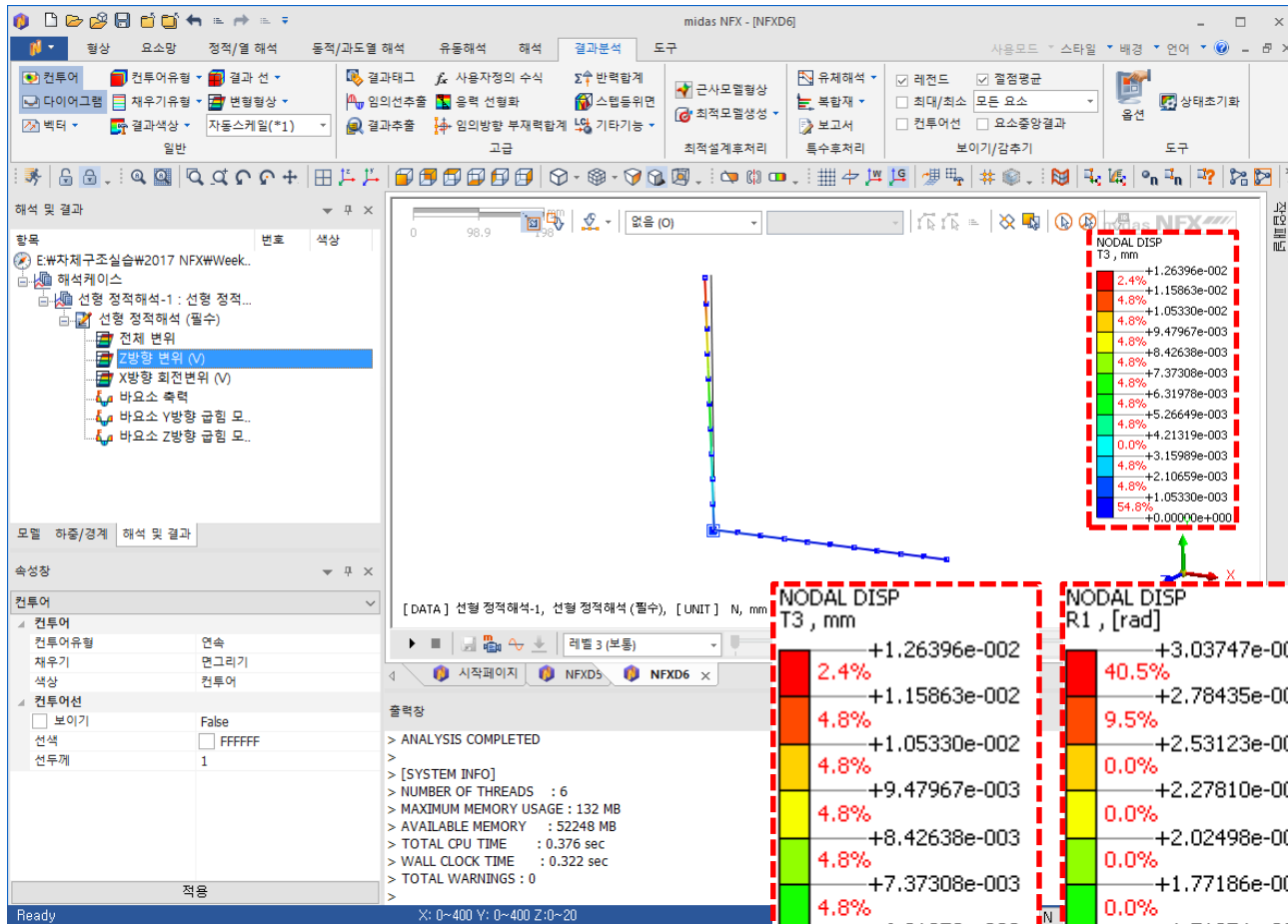


1 최대 변위는 $5.986e-3$ mm
로 기존 쉘 요소의 $1.269e-2$ mm 보다 강성이 높은 것으로 확인

따라서 스프링 강성을 변화시키면서 기존 쉘 요소의 변위를 갖는 강성을 시행착오 방법으로 구함
(Rx 스프링 강성 변경)

찾은 스프링 강성 값은 $2.4e7$ N/rad

해석 결과: 스프링 상수 변경



스프링 상수 변경 후 최대 변위는 1.26×10^{-2} mm 로 기존 쉘 요소의 1.27×10^{-2} mm 과 유사한 것을 확인

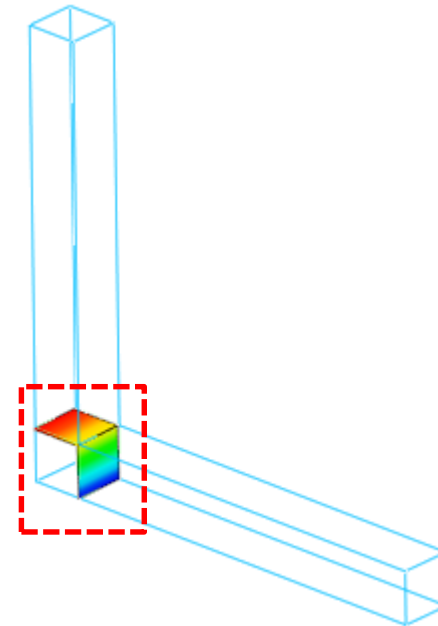
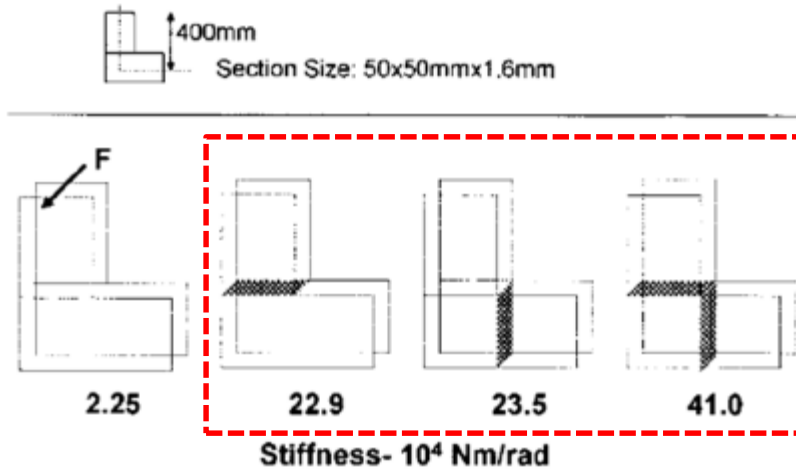
스프링 상수 변경 후 회전변위는 3.04×10^{-5} rad로 쉘 요소의 3.35×10^{-5} rad과 10% 정도의 오차를 가짐

[DATA] 선형 정적해석-1, 선형 정적해석 (결과), [UNIT] N, mm	
출력창	
> ANALYSIS COMPLETED	
> [SYSTEM INFO]	
> NUMBER OF THREADS : 6	
> MAXIMUM MEMORY USAGE : 132 MB	
> AVAILABLE MEMORY : 52248 MB	
> TOTAL CPU TIME : 0.376 sec	
> WALL CLOCK TIME : 0.322 sec	
> TOTAL WARNINGS : 0	
NODAL DISP T3, mm	NODAL DISP R1, [rad]
2.4% +1.26396e-002	40.5% +3.03747e-005
4.8% +1.15863e-002	9.5% +2.78435e-005
4.8% +1.05330e-002	0.0% +2.53123e-005
4.8% +9.47967e-003	0.0% +2.27810e-005
4.8% +8.42638e-003	0.0% +2.02498e-005
4.8% +7.37308e-003	0.0% +1.77186e-005
4.8% +6.31978e-003	0.0% +1.51874e-005
4.8% +5.26649e-003	4.8% +1.26561e-005
0.0% +4.21319e-003	9.5% +1.01249e-005
4.8% +3.15989e-003	14.3% +7.59368e-006
4.8% +2.10659e-003	9.5% +5.06245e-006
4.8% +1.05330e-003	11.9% +2.53123e-006
54.8% +0.00000e+000	+0.00000e+000

연습문제: BULKHEAD 효과

- Bulkhead 를 모델링하여 해석 수행 후 강성 비교

- Effect of added bulkhead on out-of-plane joint rigidity



해석 결과
(T/θ)

1.36 2.95 3.03 3.25

비선형 거동을 고려한 조인트 설계

비선형 정적 해석 개요

선형 거동이란?

➤ 유한요소 해석에서 가장 기본이 되는 식은 다음과 같다.

$$\{F\} = [K]\{U\}$$

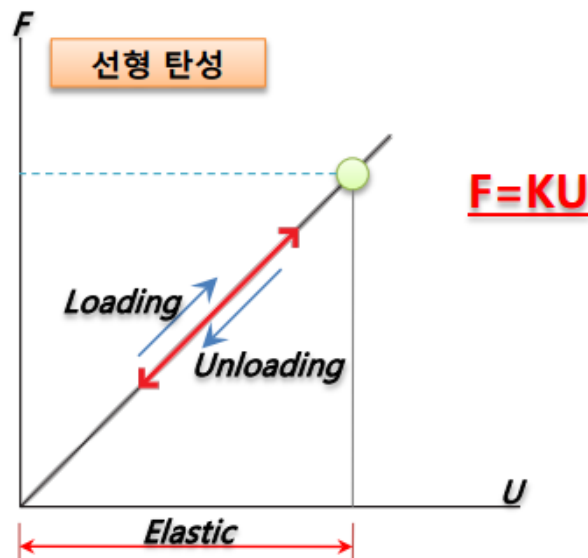
$\{F\}$: 하중 벡터

$\{U\}$: 변위 벡터

$[K]$: 강성 행렬(Stiffness Matrix)

➤ 강성행렬이 일정한 값을 가지는 경우 하중과 변위는 선형 관계에 있다고 한다.

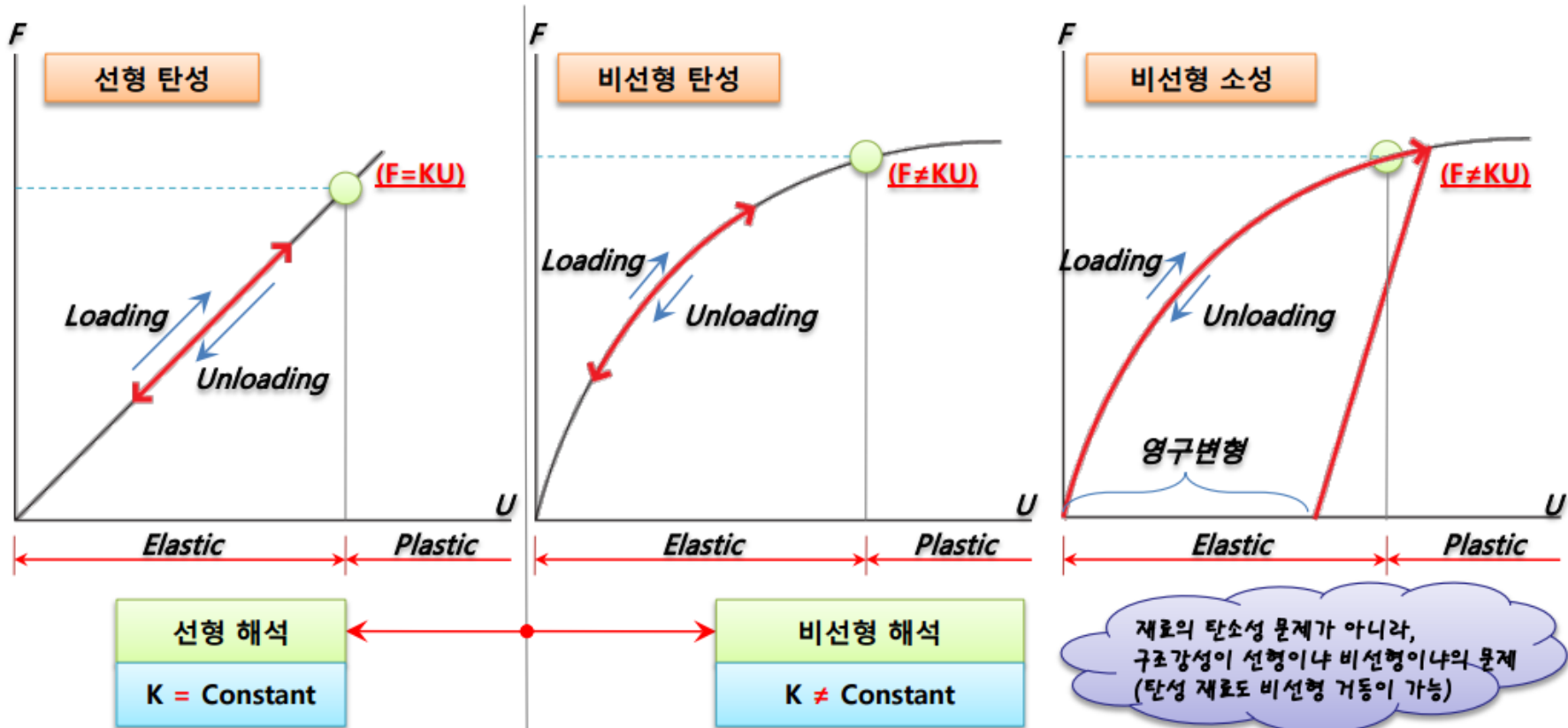
- 하중-변위 관계식이 선형 조건
- 변형 및 변형율이 미소한 경우에 적용
- 요소의 적합 및 구성 방정식이 선형
- 강성행렬이 항상 일정
- 항복강도 이하에서 해석
- 초기 모델이 평형조건식을 만족
- 경계조건이 변하지 않음
- 하중은 변위에 독립된 요소
- 변위는 하중에 선형 비례함
- 중첩의 원리 적용 가능



비선형 정적 해석 개요

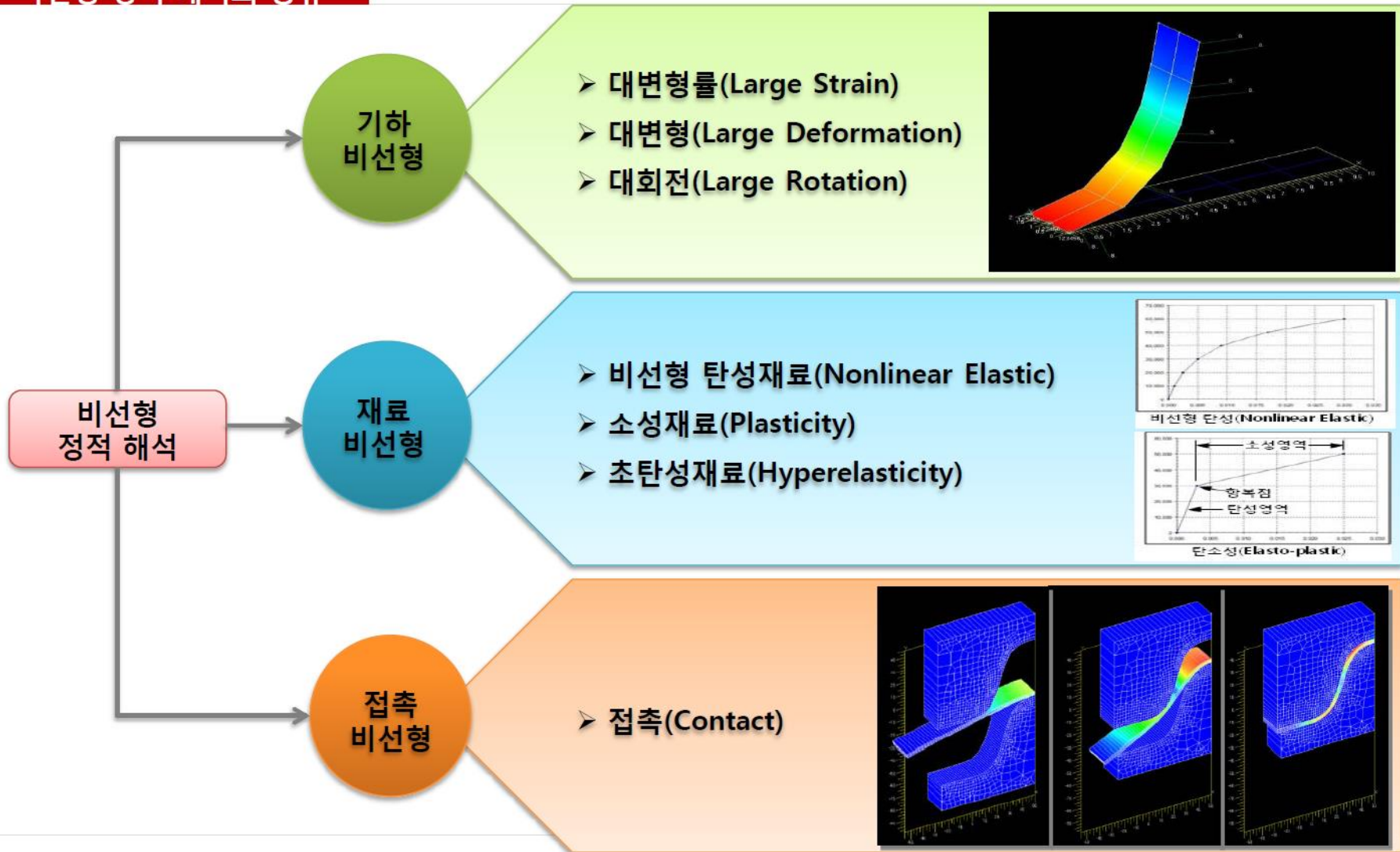
비선형 거동이란?

- 자연계의 현상은 정확히 말해서 모두 비선형 현상이라고 볼 수 있다.
- 비선형 현상을 포함하고 있는 구조물은 하중과 변위의 관계가 선형 관계를 가지고 있지 않는 것을 의미한다.
- 즉, 비선형성을 포함하고 있는 구조물의 기본적인 특성은 하중이 변함에 따라 구조 강성이 변한다는 것을 의미한다.



비선형 정적 해석 개요

비선형 정적 해석의 종류



예제: JOINT ANALYSIS

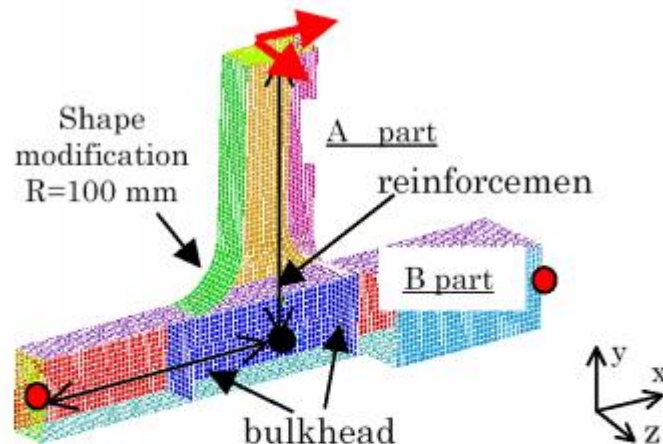
First Order Analysis for Automotive Body Structure Design -Part 2 : Joint Analysis Considering Nonlinear Behavior

Yasuaki Tsurumi, Hidekazu Nishigaki, Toshiaki Nakagawa, Tatsuyuki Amago, Katsuya Furusu
Toyota Central R&D Labs., Inc.

Noboru Kikuchi

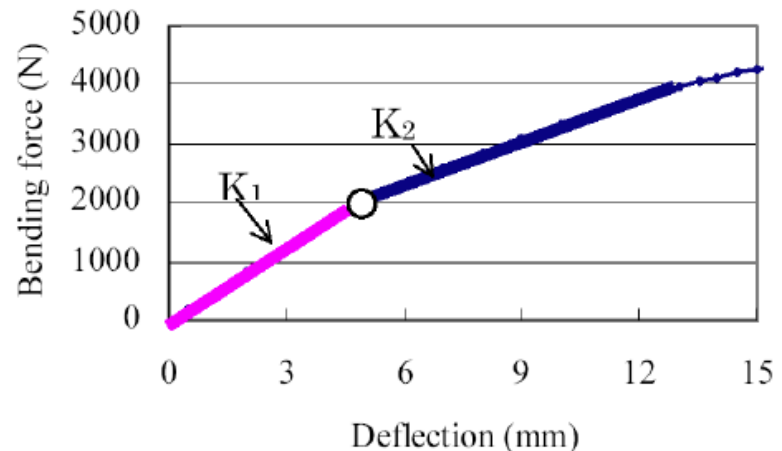
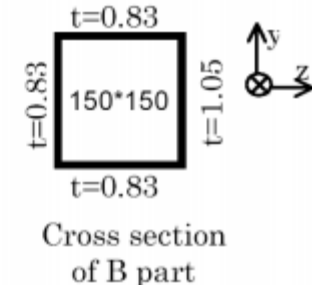
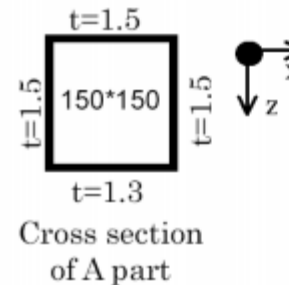
The department of Mechanical Engineering at the University of Michigan

Copyright © 2003 SAE International

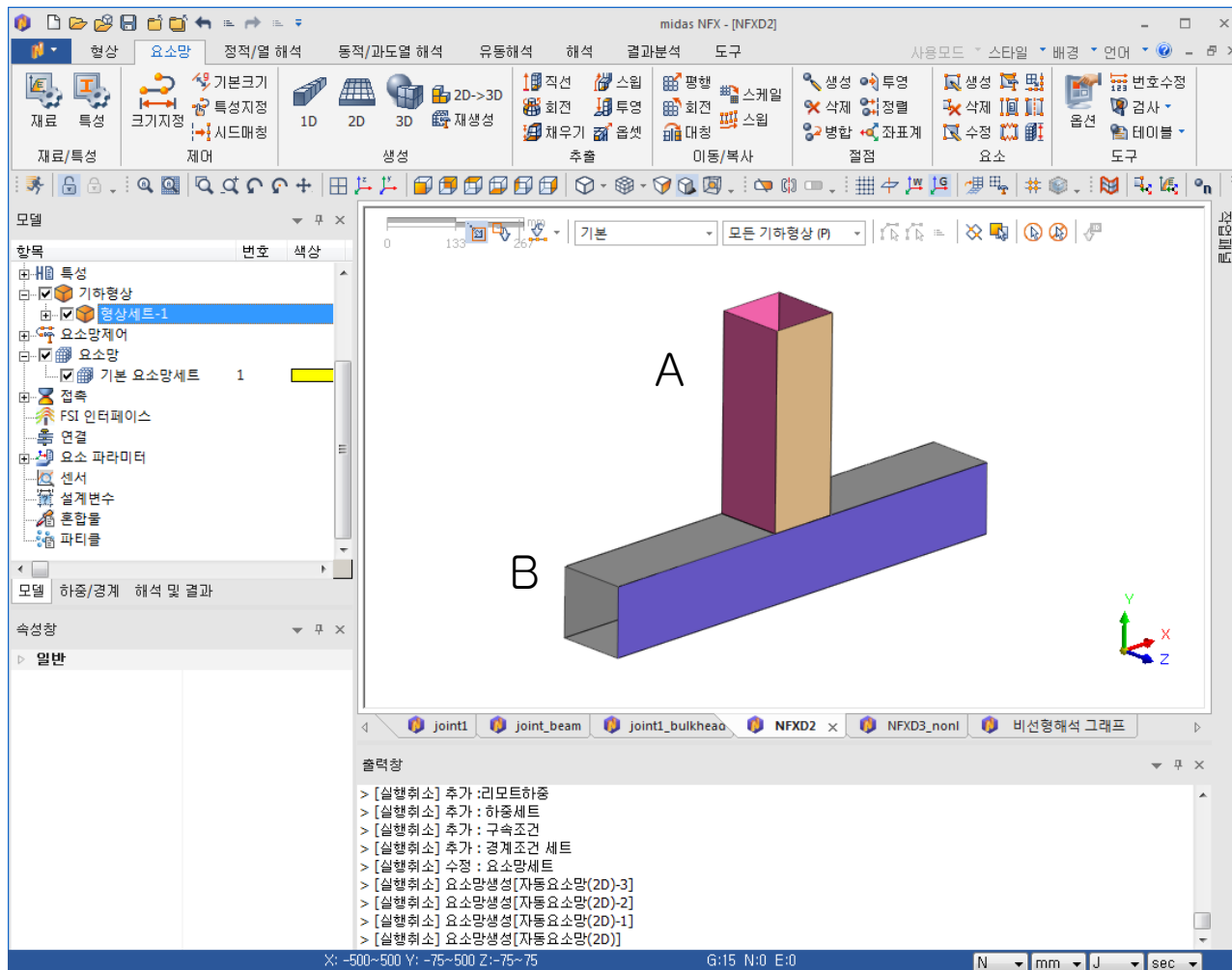


$$E(\text{young modulus}) = 203000 \left(\text{N} / \text{mm}^2 \right)$$

$$\nu(\text{poisson ratio}) = 0.3$$



기하형상 생성



1 예제의 형상을 바탕으로
A, B 파트 생성

재료 물성 및 특성 입력



1 재료 물성치 및 특성 생성

2차원 특성 생성/변경

판

번호 1 이름 1.5t 색상 [Green]

재료 1: Alloy Steel

재료좌표계

☒ 좌표계 전체직교좌표계

☐ 각도 0 [도]

두께

☒ 균일두께

기준함수 없음

T / T1 1.5 mm T2 1 mm

T3 1 mm T4 1 mm

비구조질량 0 kg/mm²

☐ 면내회전자유도 포함

옵션...

확인 취소 적용

특성 추가/수정

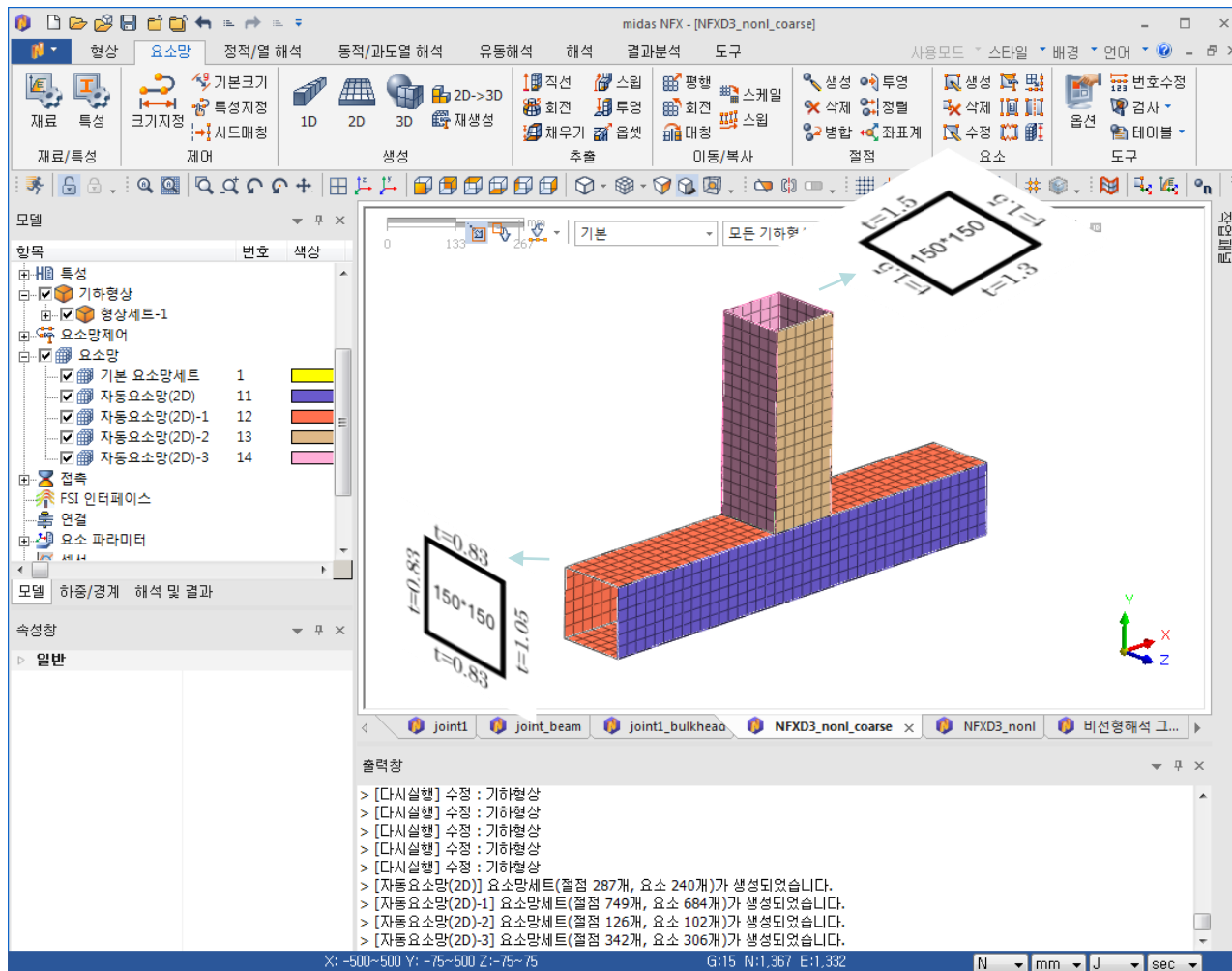
번호	이름	종류	하위종류
1	1.5t	2D	판
2	1.3t	2D	판
3	1.05t	2D	판
4	0.83t	2D	판

생성 수정... 복사 삭제 불러오기... 닫기

$$E(\text{young modulus}) = 203000 \left(N / mm^2 \right)$$

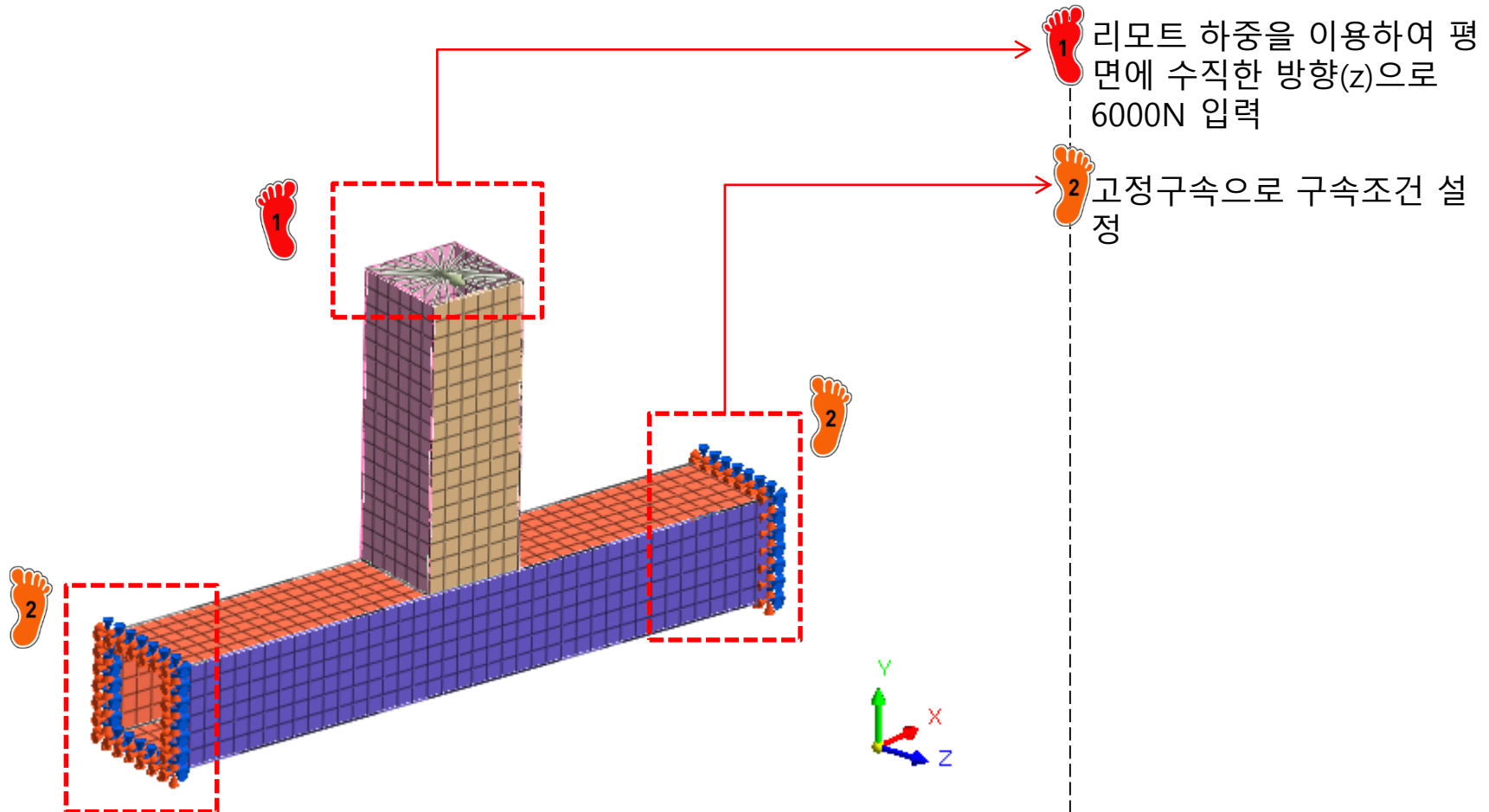
$$\nu(\text{poisson ratio}) = 0.3$$

요소망 생성

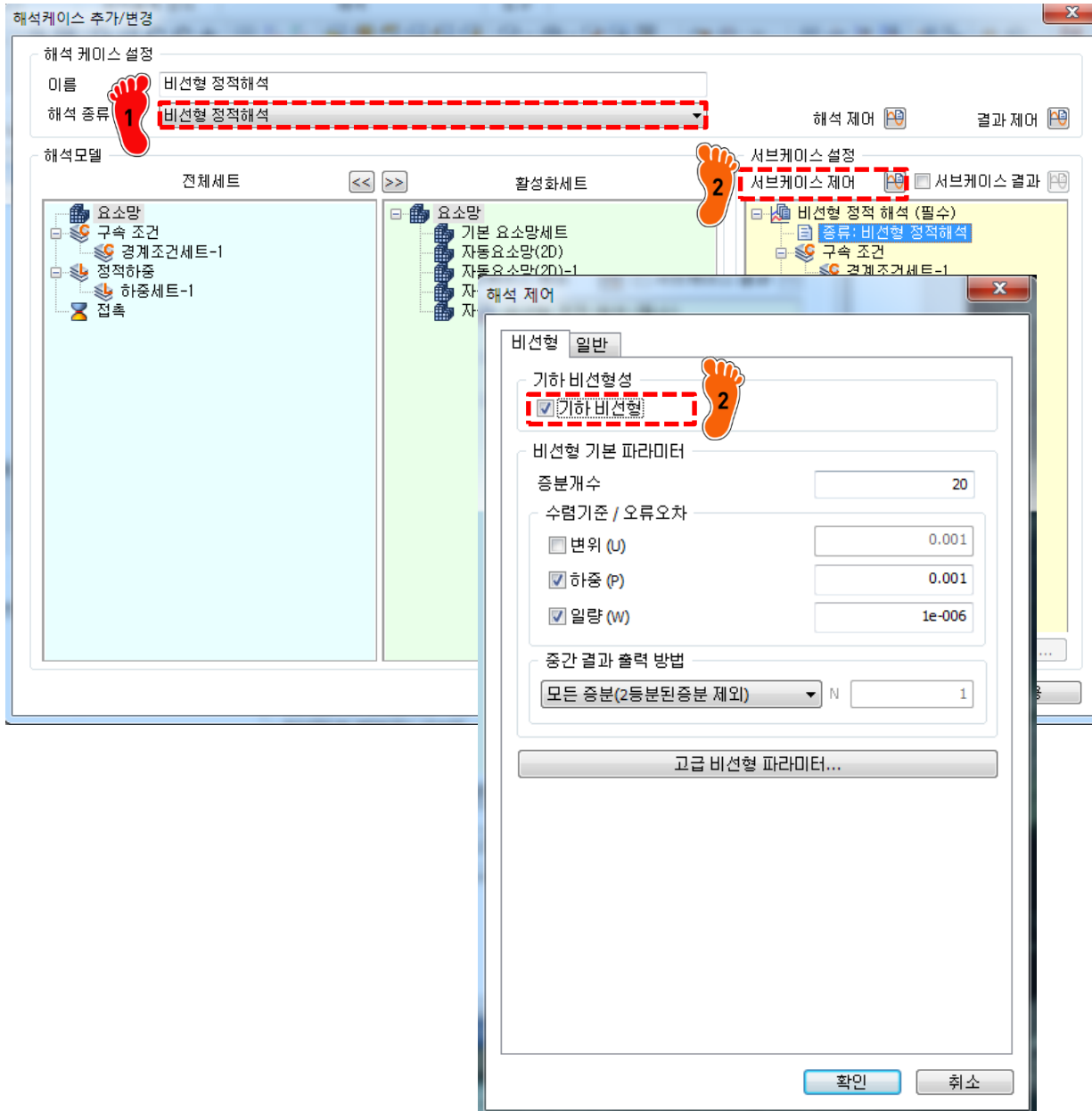


두께를 고려한 특성을 적용하여 요소 크기 25인 요소망 생성

구속조건 및 하중조건 설정



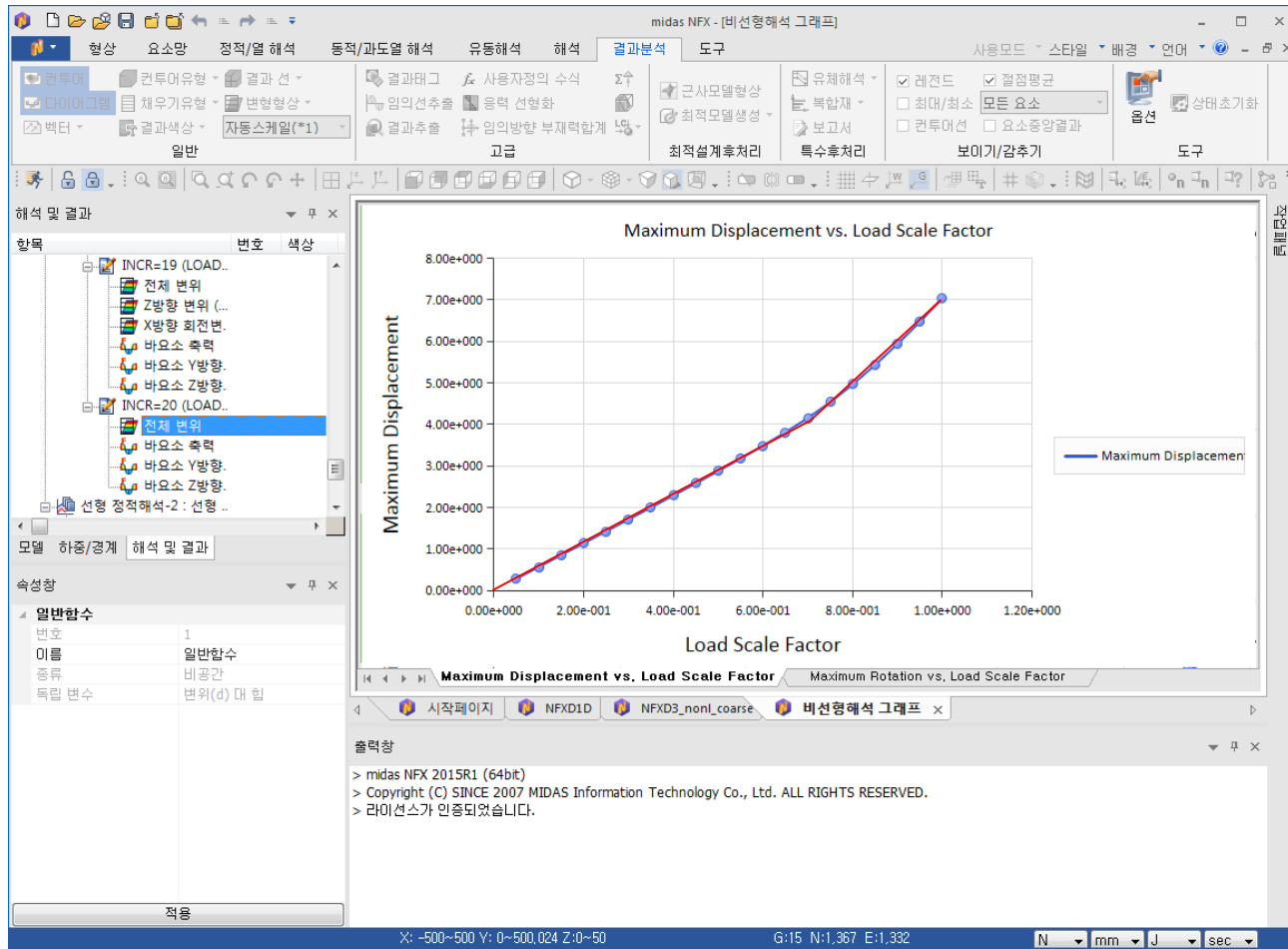
해석 케이스 정의 및 해석 실행



1 비선형 정적해석으로 해석 수행

2 서브케이스 제어에서 '기하 비선형' 선택

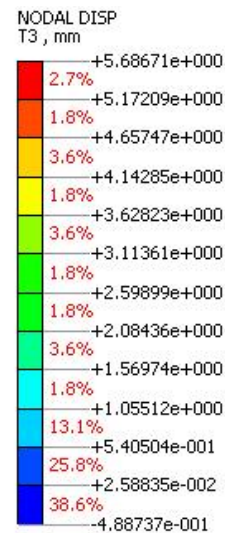
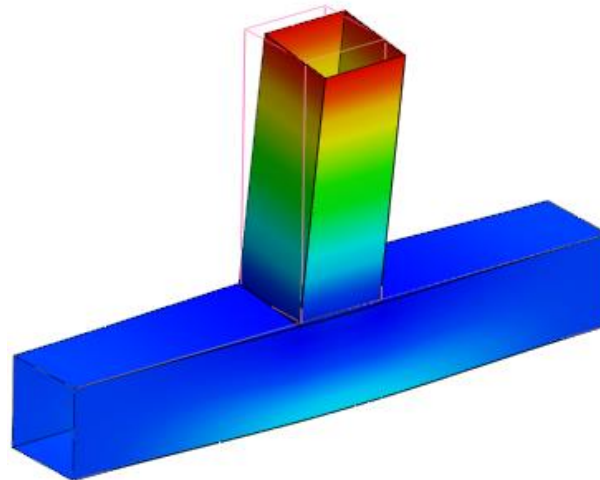
해석 결과



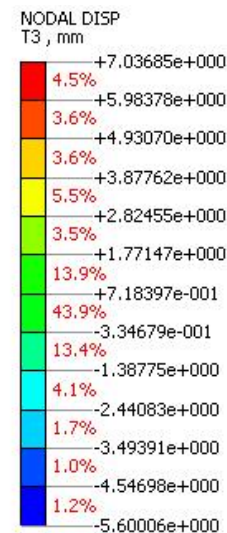
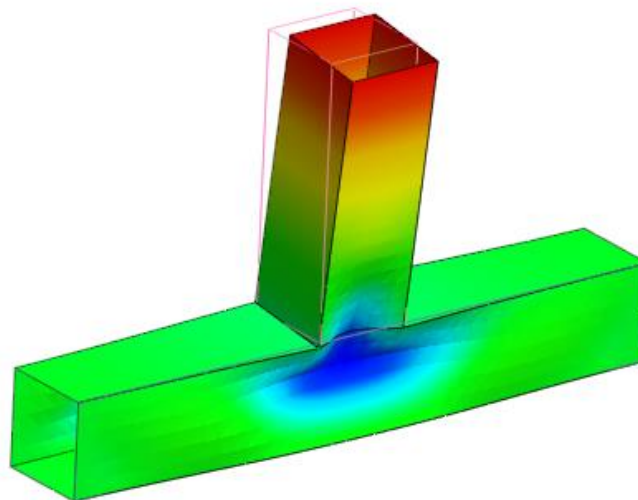
1 하중에 따라 최대 변위결과가 비선형성을 보임

해석 결과

선형 해석
변형 결과



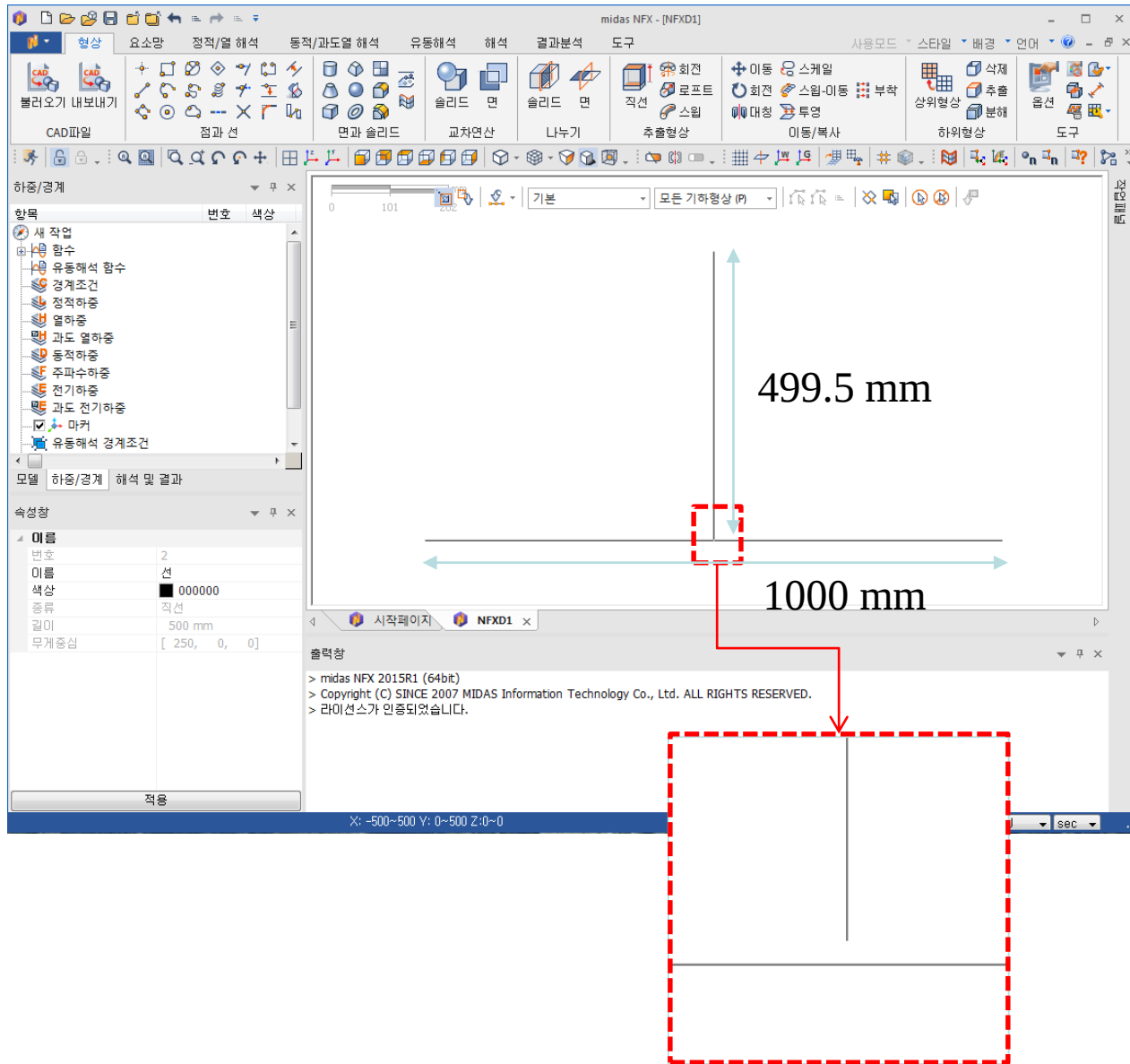
비선형 해석
변형 결과



선형 해석의 경우 5.69 mm,
비선형 해석의 경우 7.04
mm 의 변형 결과를 보임

비선형 거동을 고려한 조인트 설계 : 1D 모델링

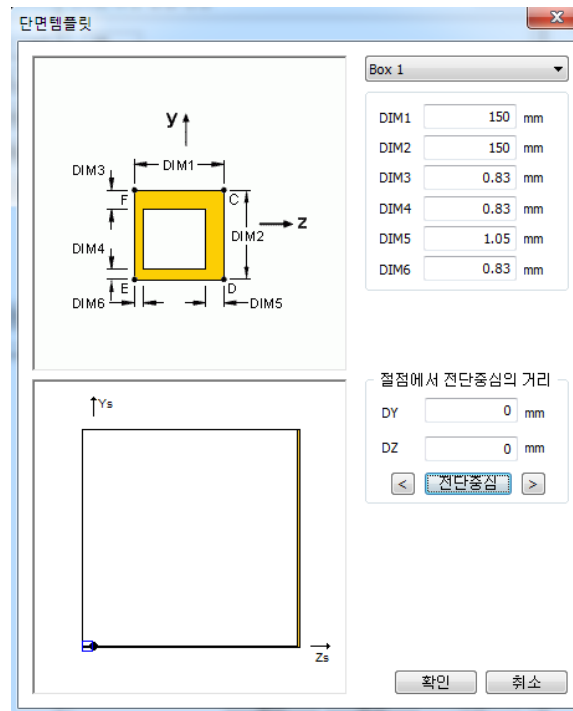
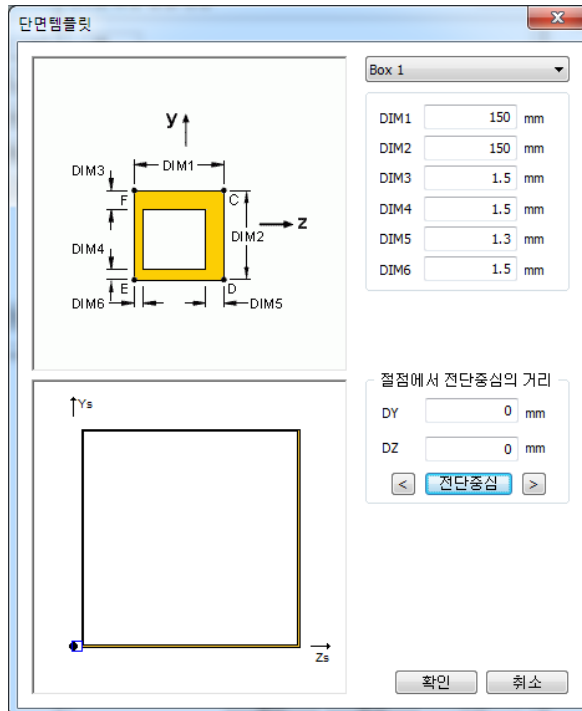
기하형상 생성



1 형상 탭 메뉴에서 점과 선 메뉴의 연결선을 이용하여 라인 생성 (하단 라인은 한번에 생성)

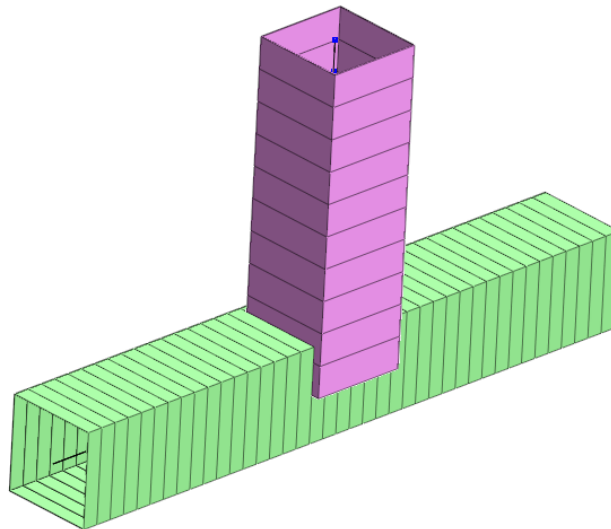
스프링을 부착할 부분을 0.5 mm 정도로 떨어트림

재료 물성/특성 입력 및 요소망 생성



1 예제에서 주어진 단면 특성을 갖는 1차원 특성 생성

2 각 특성에 맞도록 요소망 생성 (상단 10개, 하단 20개)



$$E(\text{young modulus}) = 203000 \left(N / mm^2 \right)$$

$$\nu(\text{poisson ratio}) = 0.3$$

비선형 부위 특성 생성

요소 생성/삭제

1D 2D 3D 기타 삭제

부위

요소 번호

종류와 연결정보

☒ 2절점 ☐ 절점1 ☐ 절점2

☐ 그라운드 ? 절점을 선택하세요

방향 (요소 Y축)

☐ 장조 절점 ? 절점을 선택하세요

☐ 장조 방향 ? 방향벡터는

☒ 좌표계 전체 직교좌표계

☐ 직접 입력 0, 0, 1

스프링/댐퍼 위치

☒ 비율 0.5

☐ 올셋 전체 직교좌표계

(S1, S2, S3) 0, 0, 0 mm

특성

3

요소망세트 부위

확인 취소 적용

기타 특성 생성/변경

부위

번호 3 이름 기타 특성 색상

강성

1 2 3 4 5 6

1e+010 1e+010 1e+010 1e+010 1e+010 1e+010

단위(1-3) N/mm 단위(4-6) N/mm

☐ 감쇠

1 2 3 4

0 0 0 0

단위(1-3) N·sec/mm 단위(4-6) N·sec/mm

구조감쇠

응력산정계수

이동 1

변형률산정계수

이동 1

회전

진동수의존성...

비선형성...

비선형성

☒ 변위에 따른 힘

1 없음 2 없음 3 없음 4 없음 5 없음 6 없음

☐ 속도에 따른 힘

1 없음 2 없음 3 없음 4 없음 5 없음 6 없음

확인 취소

함수 생성/변경

이름 일반함수 독립 변수 변위(d) 대 힘

변위 (mm)	힘 (N)
0.0000	0.0000
0.0062	2188607.0000
0.0124	3416298.0000

방정식

시작 1 끝 10 중분 1

값

계산

선형 구간
조인트 강성

1 스케일값

확인 취소 적용

1 부위 생성

2 특성에서 비선형성 선택

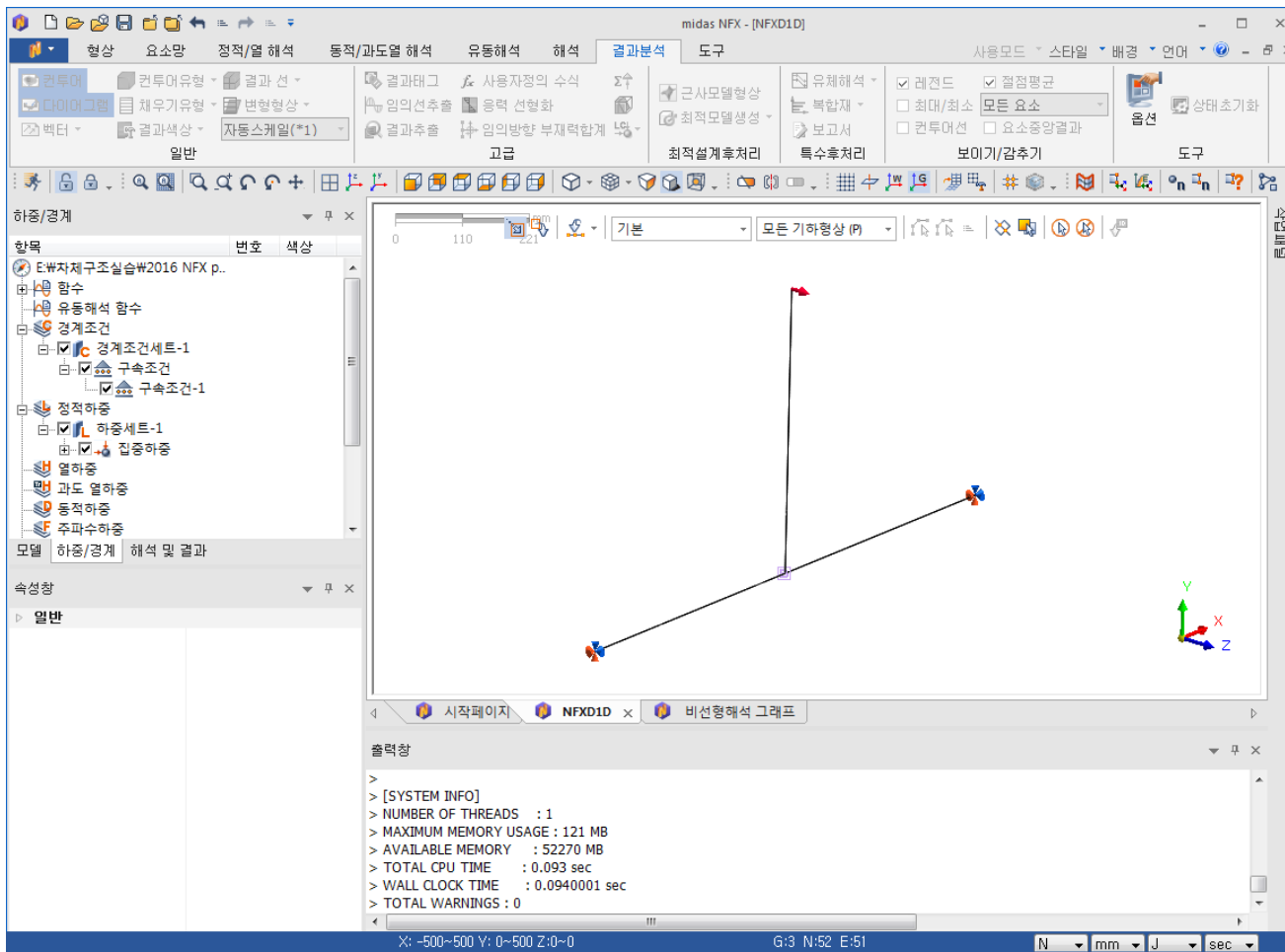
3 함수 기능을 이용하여 강성 입력

4 '변위에 따른 힘' 을 선택하고 생성한 함수를 선택

*비선형 함수

- 1) 선형 구간 기준으로 조인트 강성 계산
- 2) 3차원 결과에서 기울기가 감소한 부분의 강성 반영
- 3) 기울기가 변화하는 지점 찾기 (부위 요소의 회전 변위 기준)

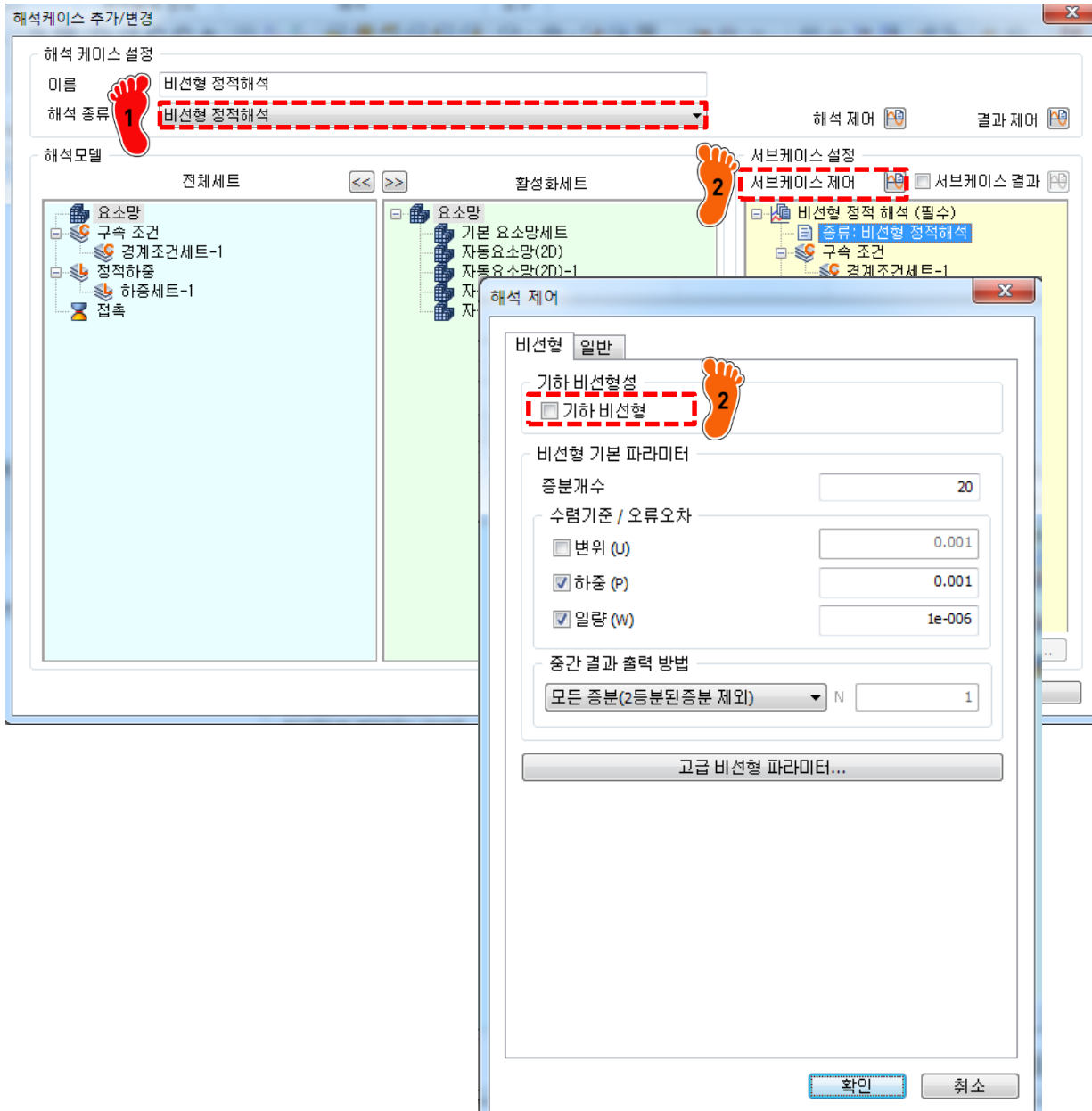
구속조건 및 하중조건 설정



예제와 동일하게 구속 조건 및 하중 조건 설정

구속 조건은 고정 구속
하중 조건은 면외 방향으로
6000N 하중입력

해석 케이스 정의 및 해석 실행



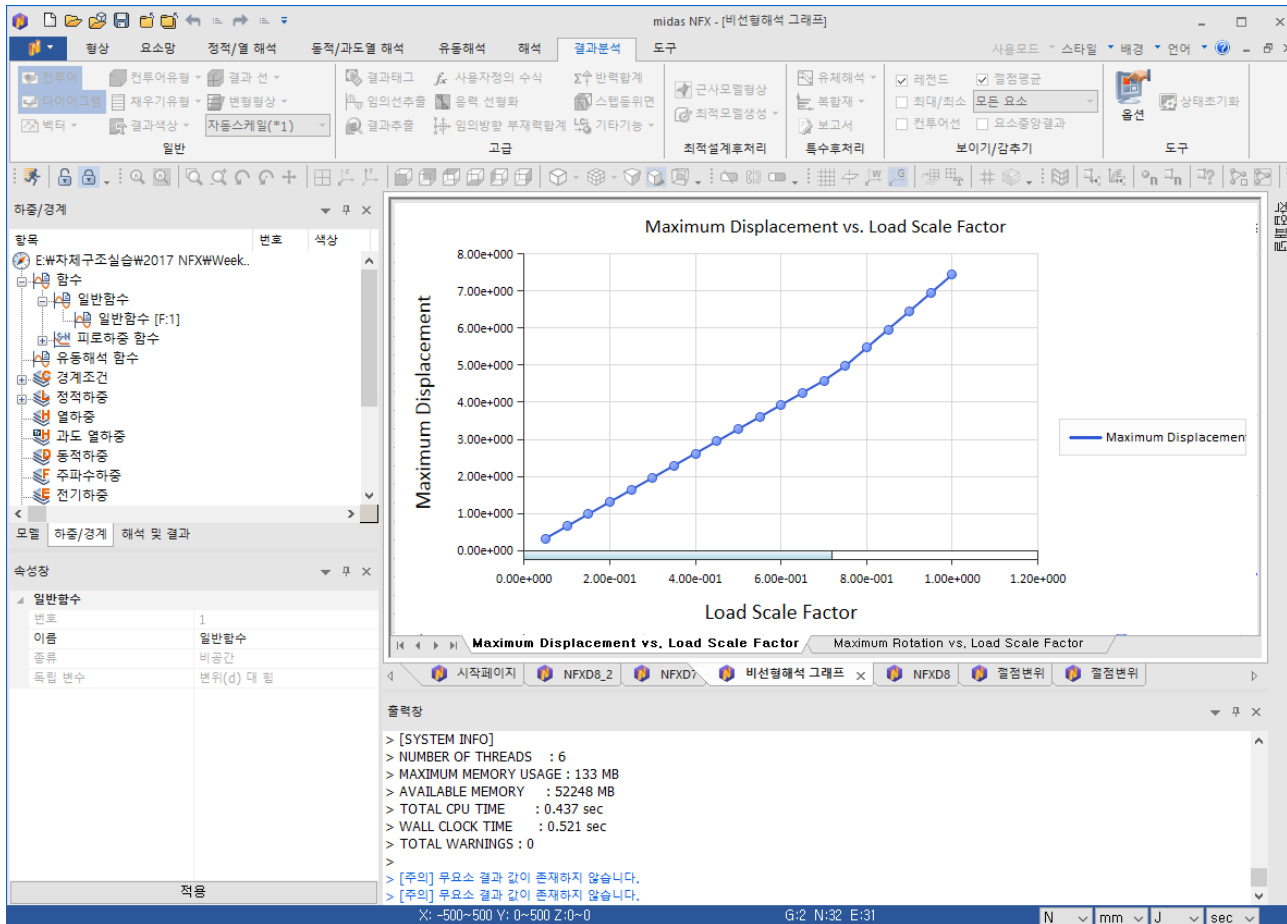
1 비선형 정적해석으로 해석 수행

2 서브케이스 제어에서 '기하 비선형' 선택 x

후처리



기존 쉘 모델과 유사한 거동을 하는지 확인



숙제

- 다음 모델에 대하여 비선형 정적 해석을 이용하여 1D 조인트 설계 수행

