

비선형 정적 해석

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



한양대학교
HANYANG UNIVERSITY

CDL Computational
Design
Lab

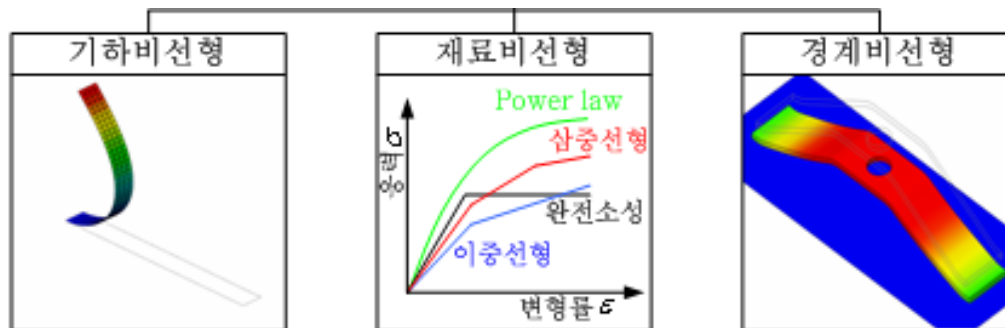
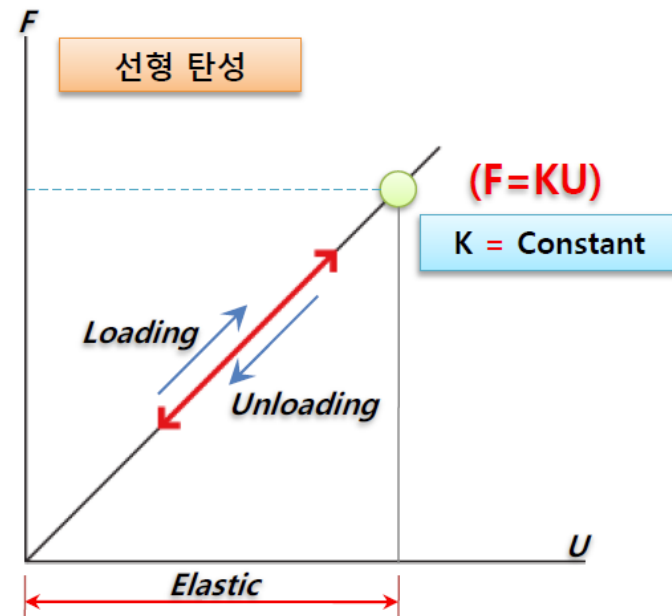
선형과 비선형

✓ 선형 문제

- 미소변형
- 선형의 응력-변형률 관계
- 해석과정 중 일정한 변위 경계조건
- 해석과정 중 일정한 작용 하중

✓ 비선형 문제

- 선형문제를 제외한 모든 문제는 비선형문제!
- 기하비선형: 비선형의 변형률-변위 관계
- 재료비선형: 비선형의 재료 구성방정식
- 경계비선형(접촉): 해석과정 중에 변하는 변위 경계조건, 접촉
- 하중의 비선형성: 종동력 (follow-up loads)



비선형 문제의 종류



비선형 해석의 계산 방법

하중을 분할하여 각 증분 구간에 대해 평형 조건을 만족하는 해를 계산

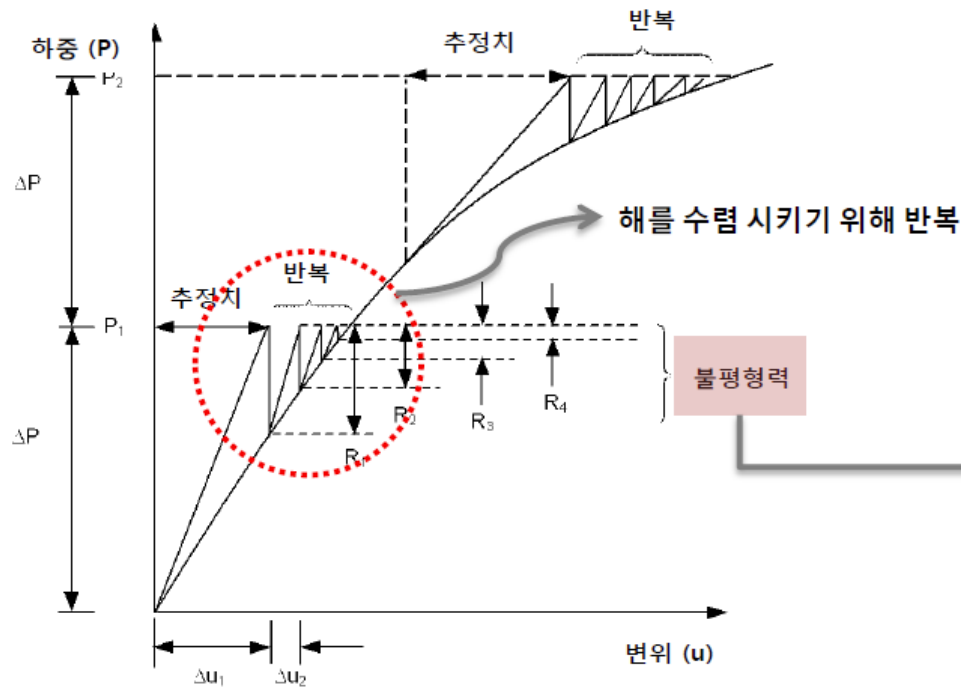
평형조건식

$$[K_T]\{\Delta U\} = \{\Delta P\}$$

K_T : 구조물의 접선 강성행렬

ΔU : 증분 변위

ΔP : 증분 하중



• Newton-Raphson Method

• 하중 증분

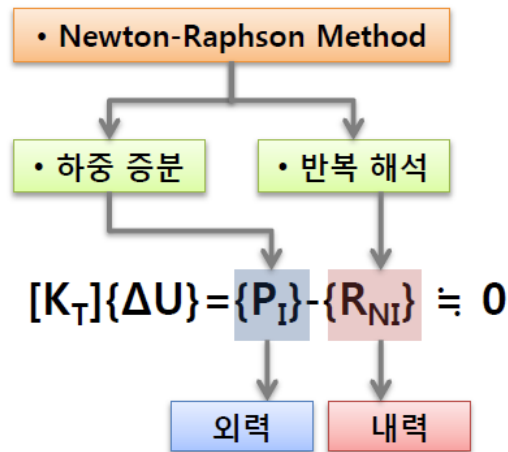
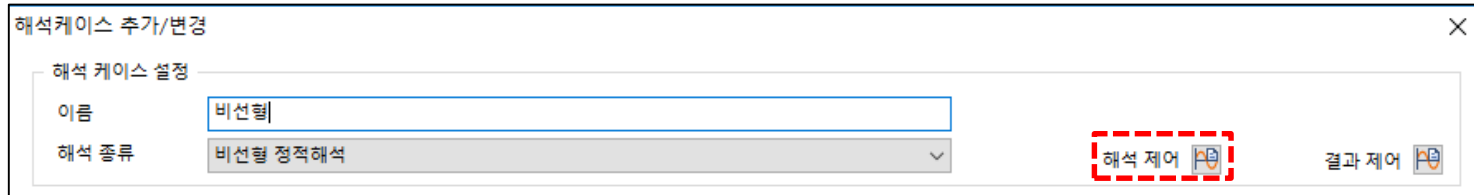
• 반복 해석

$$[K_T]\{\Delta U\} = \{P_I\} - \{R_{NI}\}$$

수렴성 판단

NFX의 비선형 해석 설정

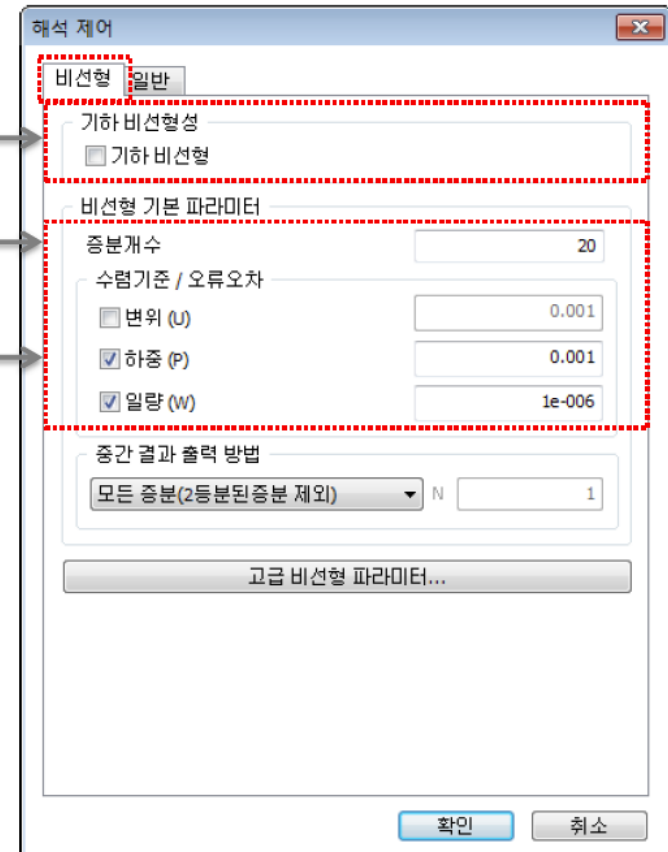
해석 케이스 생성 시 해석 제어에서 기하 비선형의 적용 및 증분 개수 설정 가능



기하비선형 정의

하중증분 정의

수렴기준 정의



- 수렴기준은 2개의 조건을 사용하는 것이 일반적입니다.
- 전통적으로 많이 사용되는 수렴조건은 하중이지만, 경우에 따라서 변위를 사용하기도 합니다.

NFX의 비선형 재료 설정

재료

번호 2 이름 등방성-1 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
SGCC
SGCD1
SHP
SM45C
SM490A(KS)
SPCC
SPDE
SPRC340
SR-0300
Steel
Steel_Rolled
SUP12
SUS304
SUS316
SUS316L
Wrought Steel
Ductile Iron
Gray Cast Iron
Iron_40
Iron_60
Iron_Cast_G2

1 탄소성 초탄성 비탄성 온도의존

조

탄성계수 0 N/mm²
프와송비 0
질량밀도 0 kg/mm³

열팽창계수 0
기준온도 0 [°C]

2 항복기준 Von Mises

소성경화 곡선 없음 함수
응력-변형률 곡선 없음 함수
경화규칙 등방성
복합경화 계수 (0.0-1.0) 0

완전 소성 재료

함수 생성/변경

응력-변형률 함수

이름 응력-변형률 함수

변형률	응력 (N/mm ²)
0.0000	0.0000
0.0001	95.0000
0.0025	100.0000
0.0100	110.0000
0.1000	120.0000
1.0000	130.0000

3

130.0000

스케일값 1

확인 취소 적용

1 비선형 재료 특성 선택

2 재료의 비선형 특성 입력

3 함수를 이용하는 경우 그림과 같이 테이블로 입력 가능

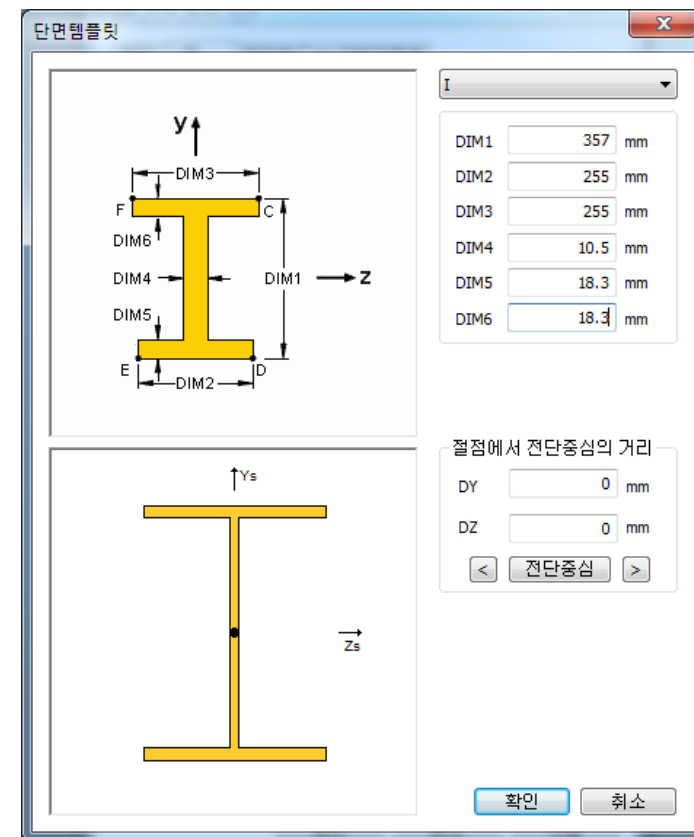
빔 모델의 해석 비교 (선형/기하비선형/종동력)

빔 해석 예제

외팔보 예제



빔 단면 정보
: W360 X 101



기하형상

- L = 5000 mm
- 재료 : alloy steel
- E = 210 GPa
- $\nu = 0.28$
- 하중(F): 3000 kN

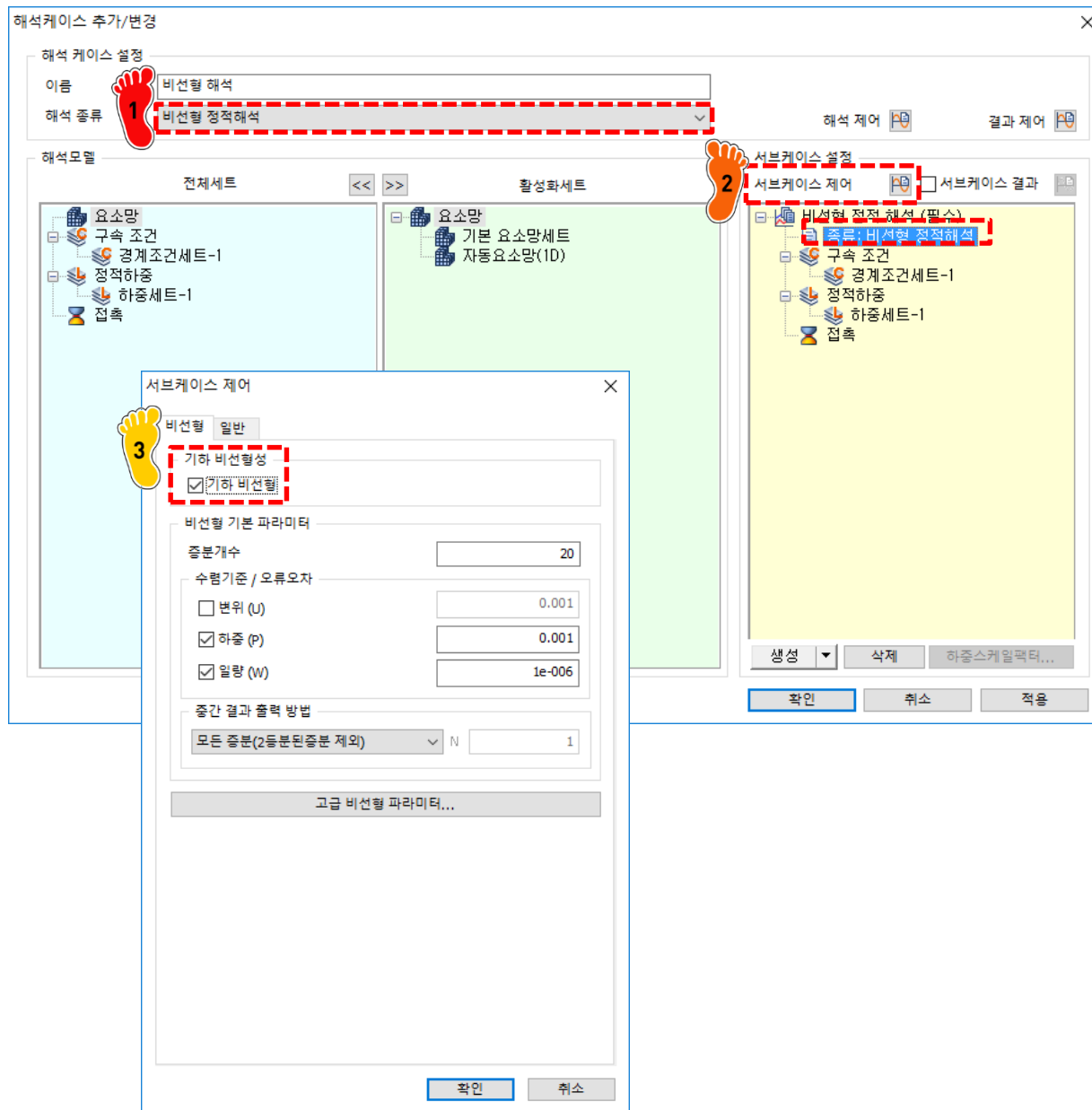
이론 해 (선형)

$$\sigma = \frac{My}{I} = 9020 \text{ MPa}$$

$$y_{\max} = \frac{PL^3}{3EI} + \frac{PL}{GA_s} = -2059 \text{ mm}$$

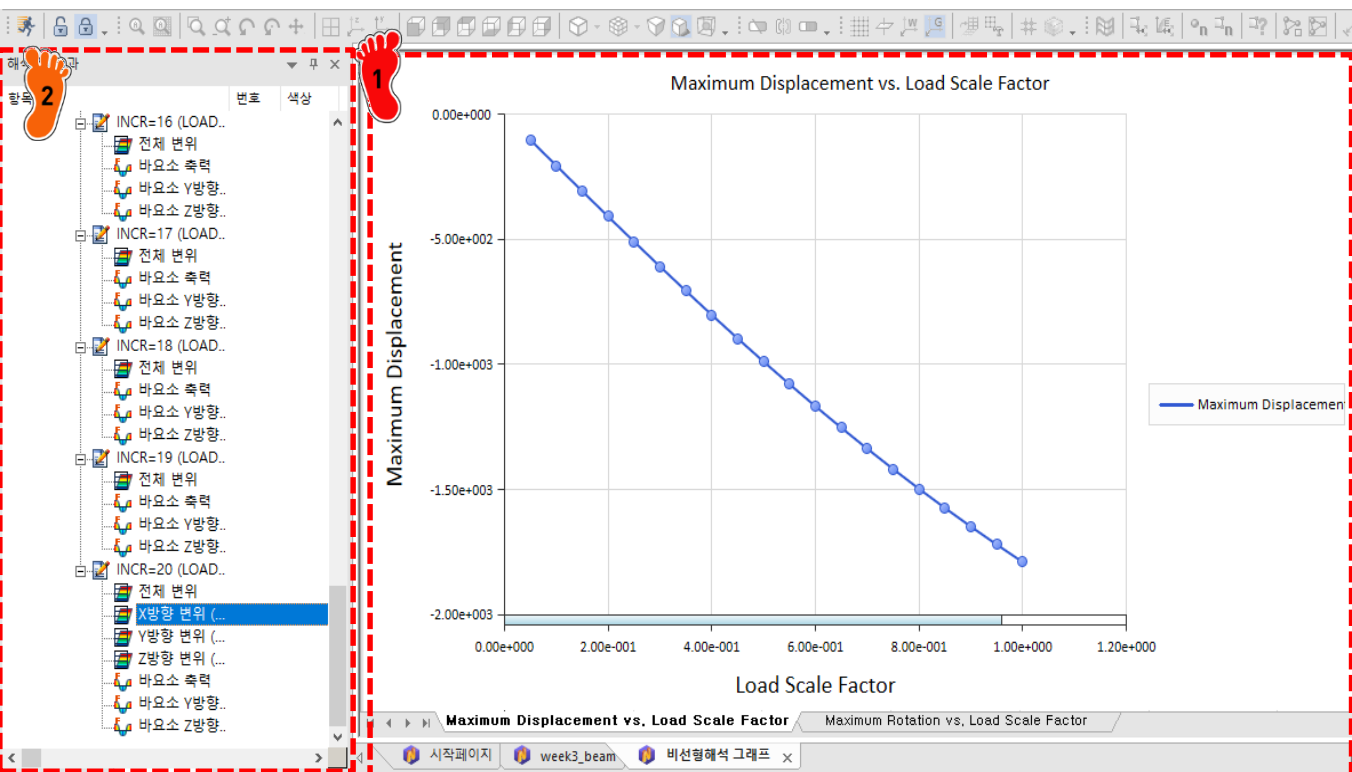
$A_s = kA$: 유효전단면적

비선형 해석 케이스 설정



- 1 해석 케이스에서 '비선형 정적해석' 선택
- 2 서브케이스 제어 선택
- 3 기하 비선형 체크
(아래 옵션은 기본으로 설정)

비선형 해석 결과

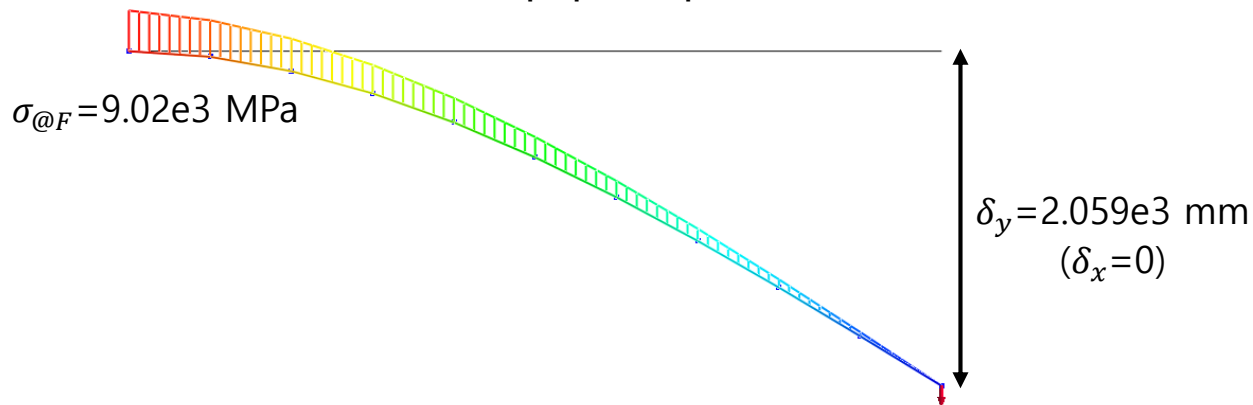


비선형 해석 시 '비선형해석 그래프' 화면이 생성됨

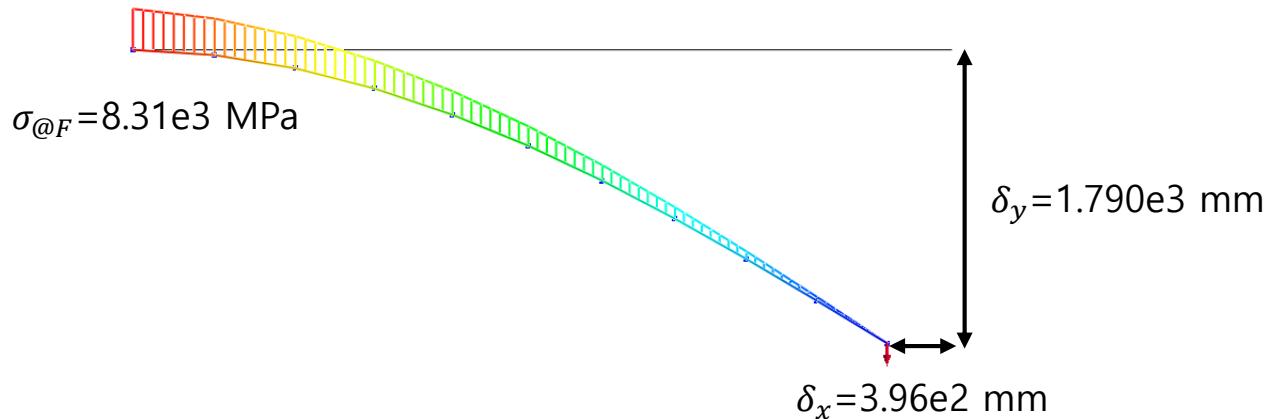
해석 결과 창에서 각 스텝별 결과 확인 가능

선형/비선형 해석 비교

선형 해석 결과



기하 비선형 해석 결과

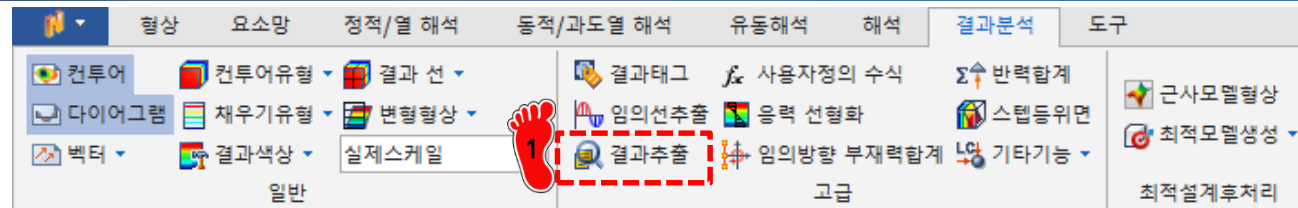


비선형 해석의 경우 하중이 가해지지 않은 x방향에도 변형이 나타난 것을 확인



비선형 해석의 경우 선형 해석 대비 y방향의 변위, 고정점의 응력이 낮게 나타남

하중-변위 그래프



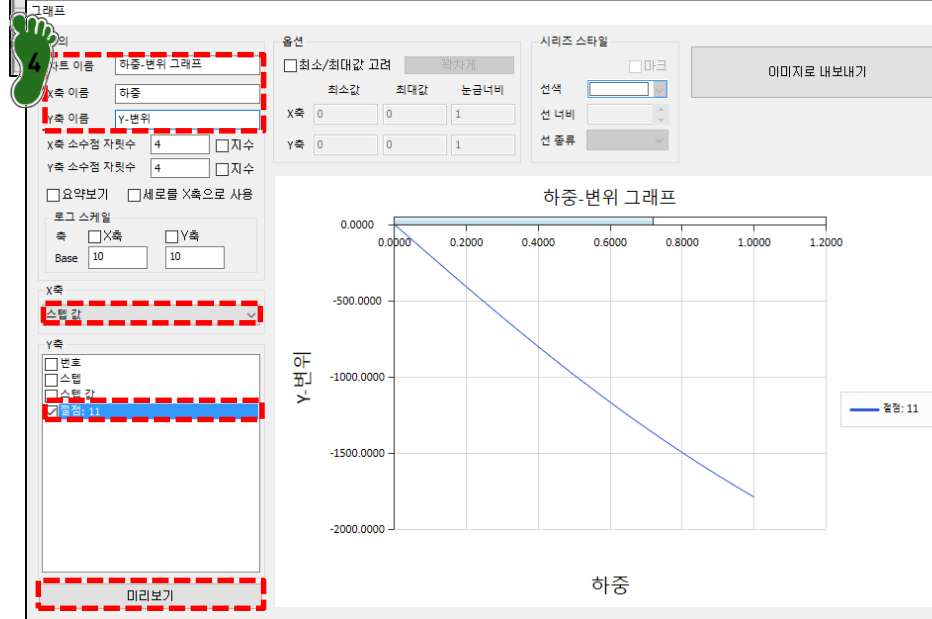
1 결과분석 탭의 '결과추출' 클릭



번호	스텝	스텝 값	절점: 11 (mm)
1	비선형 정적해석 (물수):INCR=0 (LOAD=0.000)	0.000000e+000	0.000000e+000
2	비선형 정적해석 (물수):INCR=1 (LOAD=0.050)	5.000000e-002	1.028800e+000
3	비선형 정적해석 (물수):INCR=2 (LOAD=0.100)	1.000000e-001	-2.055000e-001
4	비선형 정적해석 (물수):INCR=3 (LOAD=0.150)	1.500000e-001	-3.076000e-001
5	비선형 정적해석 (물수):INCR=4 (LOAD=0.200)	2.000000e-001	-4.089000e-001
6	비선형 정적해석 (물수):INCR=5 (LOAD=0.250)	2.500000e-001	-5.093007e-001
7	비선형 정적해석 (물수):INCR=6 (LOAD=0.300)	3.000000e-001	-6.084077e-001
8	비선형 정적해석 (물수):INCR=7 (LOAD=0.350)	3.500000e-001	-7.060820e-001
9	비선형 정적해석 (물수):INCR=8 (LOAD=0.400)	4.000000e-001	-8.021385e-001
10	비선형 정적해석 (물수):INCR=9 (LOAD=0.450)	4.500000e-001	-8.964132e-001
11	비선형 정적해석 (물수):INCR=10 (LOAD=0.500)	5.000000e-001	-9.887638e-001
12	비선형 정적해석 (물수):INCR=11 (LOAD=0.550)	5.500000e-001	-1.079070e-001
13	비선형 정적해석 (물수):INCR=12 (LOAD=0.600)	6.000000e-001	-1.167234e-001
14	비선형 정적해석 (물수):INCR=13 (LOAD=0.650)	6.500000e-001	-1.253177e-001
15	비선형 정적해석 (물수):INCR=14 (LOAD=0.700)	7.000000e-001	-1.336843e-001
16	비선형 정적해석 (물수):INCR=15 (LOAD=0.750)	7.500000e-001	-1.418192e-001
17	비선형 정적해석 (물수):INCR=16 (LOAD=0.800)	8.000000e-001	-1.497201e+003
18	비선형 정적해석 (물수):INCR=17 (LOAD=0.850)	8.500000e-001	-1.573853e+003

2 비선형 해석케이스와 하중 방향 변위 선택 후 출력기준에 스텝, 추출 절점에 끝단의 절점 선택

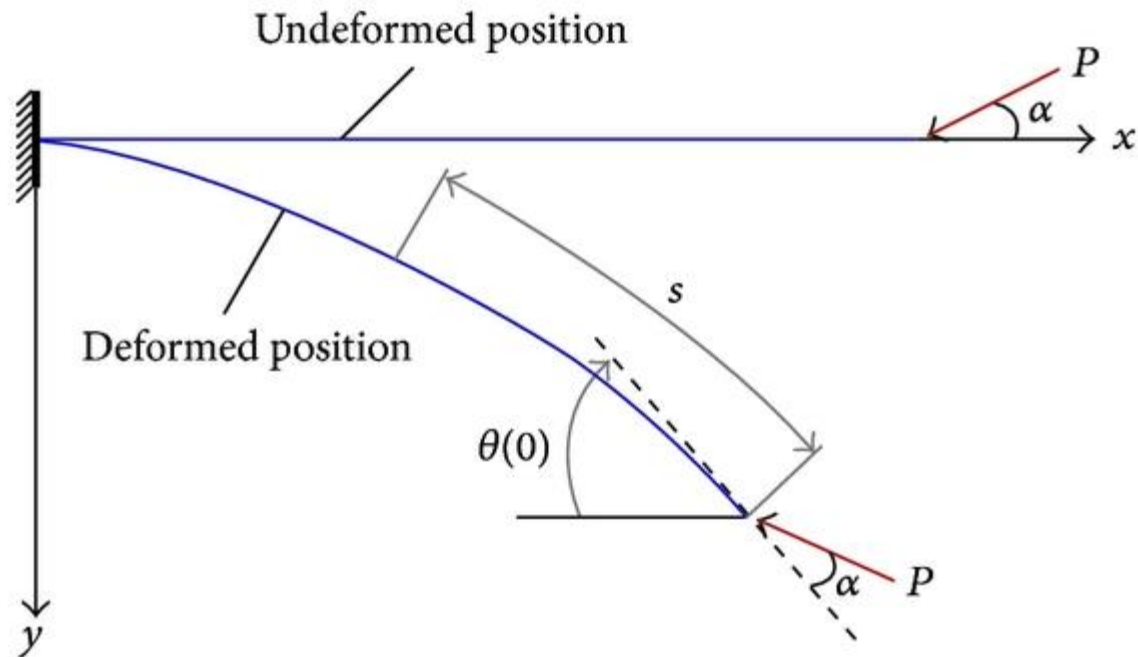
3 테이블에서 오른쪽 마우스 클릭하여 그래프 보기 클릭



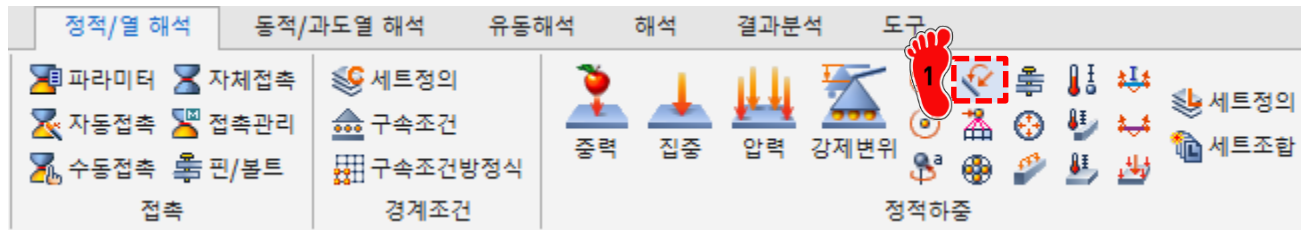
4 차트 이름과 축 이름을 입력하고 X축, Y축에 나타날 데이터 선택 후 미리보기를 이용하여 그래프 생성

FOLLOWER LOAD (종동력)

변형이 큰 경우, 하중의 방향이 변화하는 것도 고려가 필요함 → 종동력



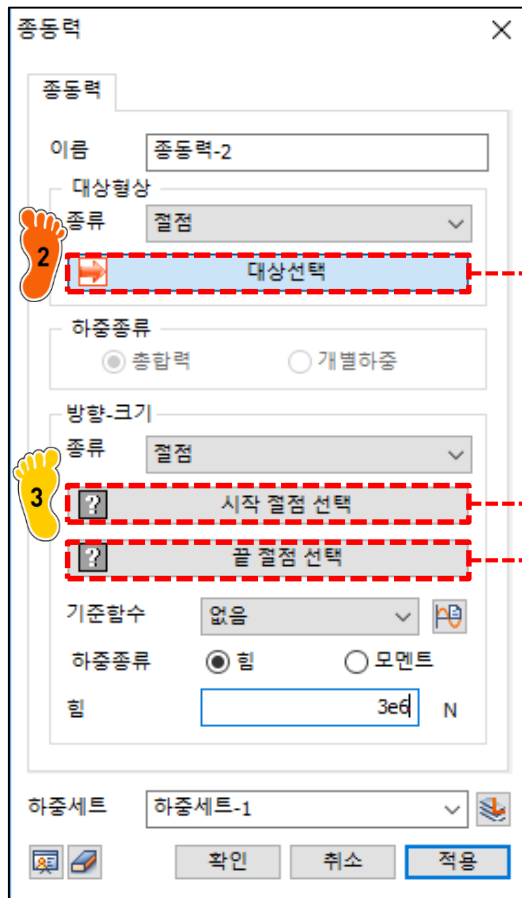
NFX의 종동력 하중 적용



1 정적/열 해석 탭의 종동력 선택

2 하중이 적용될 위치 선택

3 하중의 방향을 계산할 절점 선택 필요
→ 강제 요소를 이용
(p.15 참고)



시작 절점: 하중절점과 동일
끝 절점: 강제요소의 나머지 절점

강체 요소 생성 방법

요소 탭: 정적/열 해석, 동적/과도열 해석, 유동해석, 해석, 결과분석, 도구

복합단면: 기본크기, 크기지정, 특성지정, 시드매칭, 제어

생성: 1D, 2D, 3D, 2D->3D, 재생성

추출: 직선, 회전, 채우기, 투영, 울셋

이동/복사: 평행, 회전, 대칭, 스케일, 스윙

이동/복사 (대화상자): 대상 선택 (요소, 요소셋, **절점**), 방향 선택 (2점 벡터, X, Y, Z), 방법 (이동, **복사**), 거리 (100), 반복 (1)

요소 생성/삭제 (대화상자): 1D, 2D, 3D, **기타**, 삭제, 강체, 요소 번호 (13), 종류 (강체), 주 절점 (절점, **절점 [11] 선택됨**), 종속 절점 (1개 대상 선택됨), 자유도 (Tx, Ty, Tz, Rx, Ry, **Rz**, 온도), 비선형 옵션 (비선형 고려), 특성 (1: 1차원 특성)

생성 (툴바): 평행, 스케일, 회전, 스윙, 대칭, 이동/복사, 생성, 투영, 울셋, 삭제, 정렬, 병합, 좌표계, 절점, 수정, 절점연결, 스무드, 하위요소, 요소분할

1 요소 탭의 '평행' 선택

2 평행 이동할 절점 선택 후 수직인 방향(하중방향)으로 생성 (12번 노드 생성됨)

3 요소 탭의 '생성' 선택

4 기타 탭에서 강체를 선택하고 절점 및 자유도 선택 (대회전 고려 체크해제)

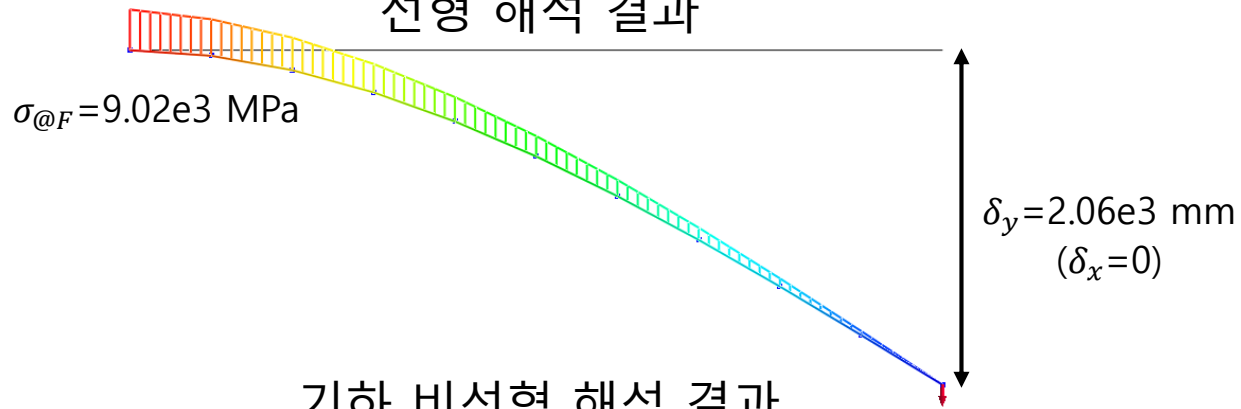
3차원 모델로 시작한 경우 아래와 같이 설정

자유도

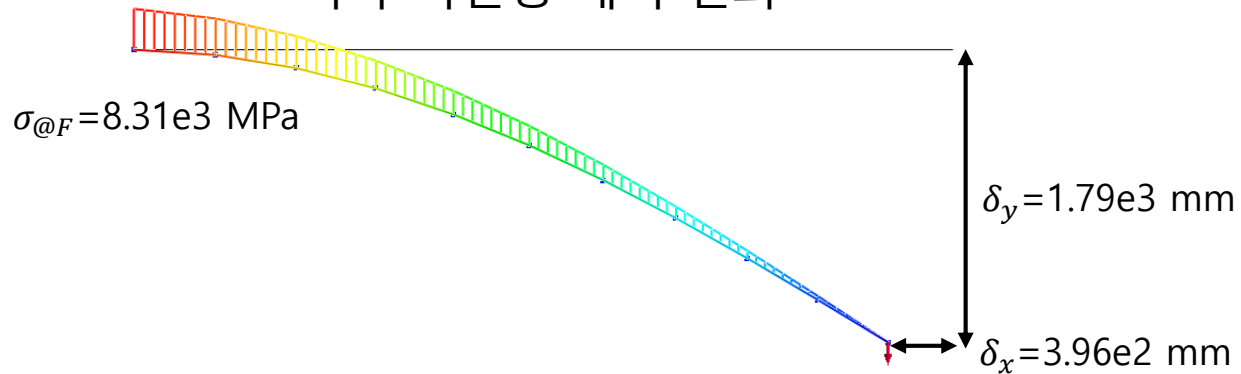
☒ Tx ☒ Ty ☒ Tz ☒ Rx ☒ Ry ☒ Rz
☒ 온도

선형/비선형 해석 비교

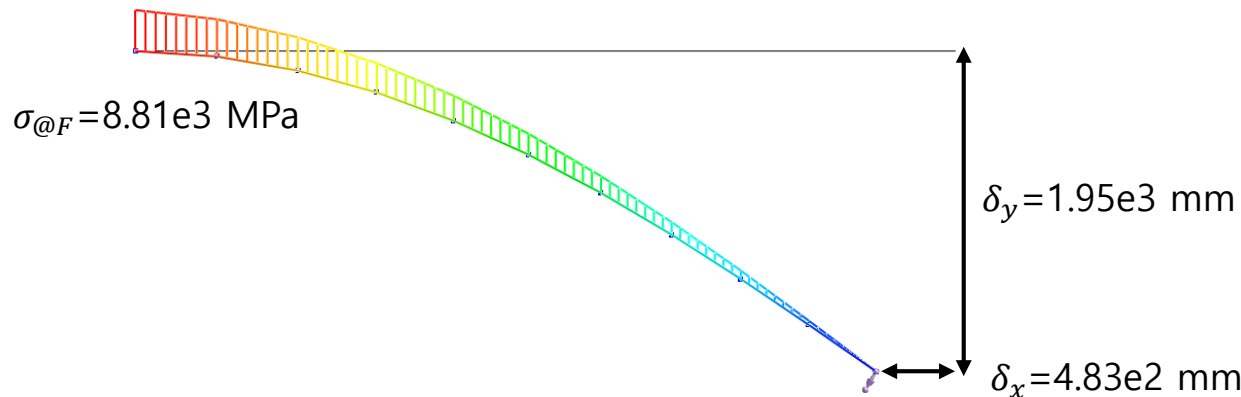
선형 해석 결과



기하 비선형 해석 결과



종동력 해석 결과



종동력 해석의 경우 하중의 방향이 변화한 것을 확인. 기존 비선형 해석 대비 X,Y의 변위, 응력도 모두 증가함.

결과 확인 시 모델 탭에서 강체 체크해제

요소망			
☒	기본 요소망세트	1	
☒	자동요소망(1D)	2	
☒	복사된 요소망-1	4	
☐	강체	5	

해석 결과

변형 정도에 따라 기하비선형/종동력을 적절히 적용하는 것이 필요함

		선형	기하비선형	기하비선형 (종동력)
수직 응력 (MPa)		9.02e3	8.31e3	8.81e3
변위 (mm)	X방향	0	-3.96e2	-4.83e2
	Y방향	-2.06e3	-1.79e3	-1.95e3

SHELL 요소

비틀림 해석 (closed section/spot weld flange)

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



한양대학교
HANYANG UNIVERSITY

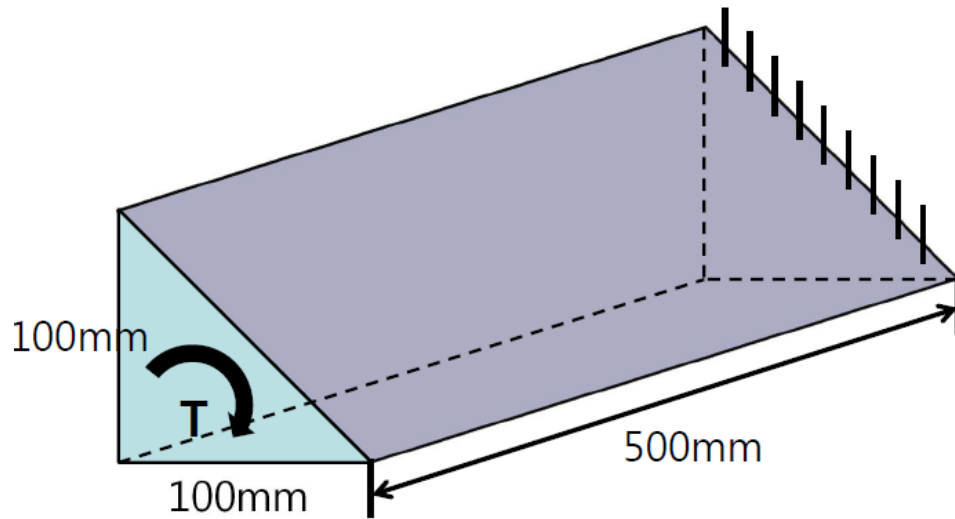
CDL Computational
Design
Lab

목차

- 예제 문제
 - Closed section beam
 - Spot weld flange
- 해석 프로세스
 - 기하형상 생성
 - 재료 물성 및 특성 입력
 - 요소망 생성
 - 구속조건 설정
 - 하중조건 설정
 - 해석케이스 정의 및 해석 실행
 - 후처리

예제: CLOSED SECTION BEAM

비틀림 강성을 계산하시오



재료 물성

- $E = 207 \text{ GPa}$

- $\nu = 0.327$

입력 하중

- $T = 250 \text{ kNm}$

$$\theta = \frac{TL}{GJ_{EFF}} = \frac{(25 \times 10^4 \text{ Nmm})(500 \text{ mm})}{(78 \times 10^3 \text{ N/mm}^2) \times \frac{4 \left(\frac{1}{2} (100 \text{ mm})(100 \text{ mm}) \right)^2 (1 \text{ mm})}{(100 \text{ mm} + 100 \text{ mm} + 141.4 \text{ mm})}} = 5.471 \times 10^{-3} \text{ rad}$$

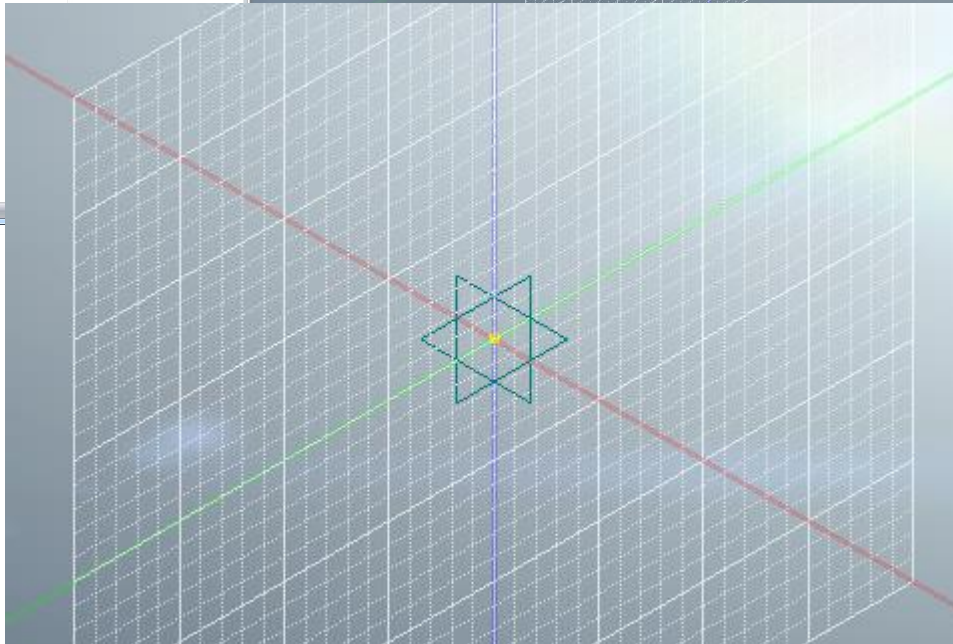
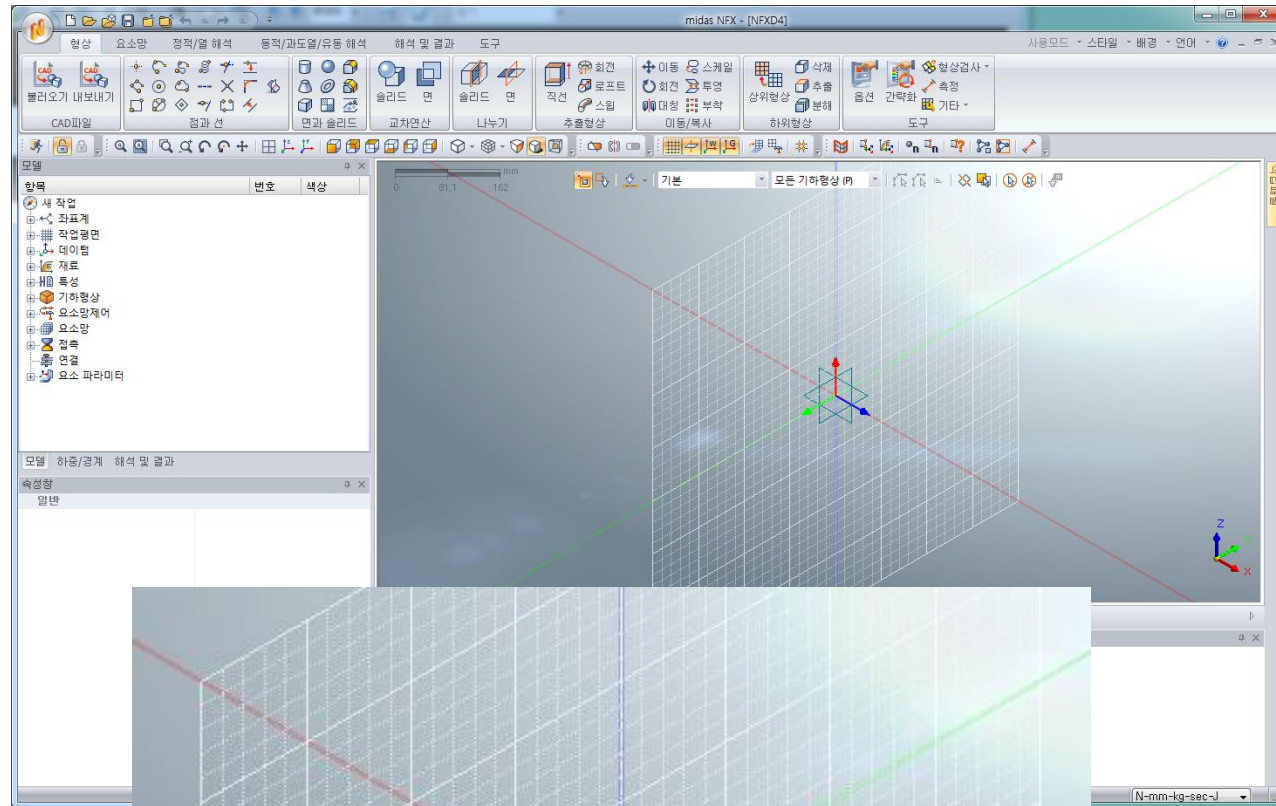
$$K = \frac{T}{\theta} = \frac{25 \times 10^4 \text{ Nmm}}{5.47 \times 10^{-3} \text{ rad}} = 45.704 \text{ Nm/rad}$$

$$\tau = \frac{T}{2tA} = \frac{25 \times 10^4 \text{ Nmm}}{2(1 \text{ mm}) \left(\frac{1}{2} (100 \text{ mm})(100 \text{ mm}) \right)} = 25 \text{ N/mm}^2 = 25 \text{ MPa}$$

CLOSED SECTION

셸 요소

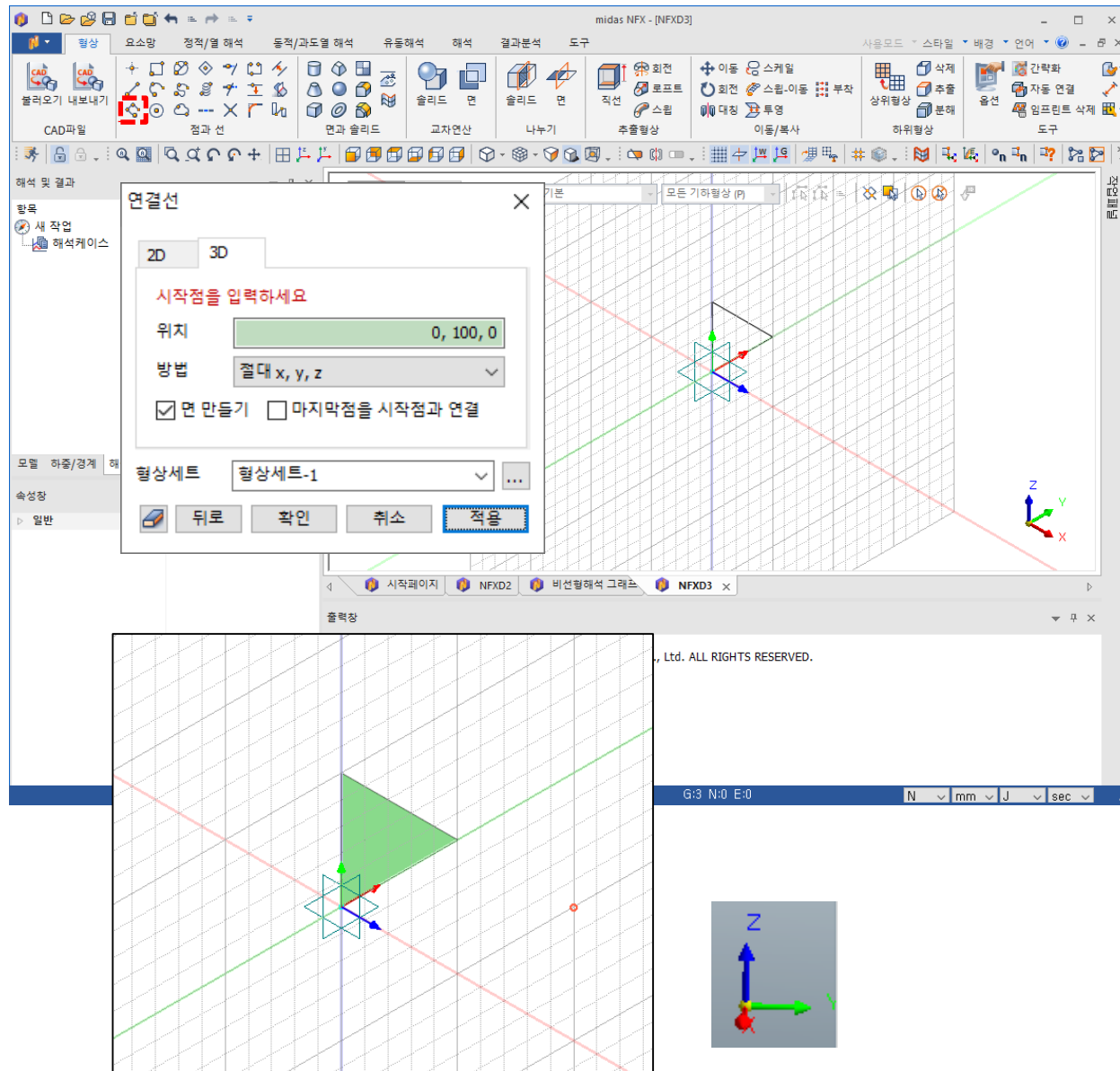
기하형상 생성 (1)



1 작업 평면 옮기기를 통해 전체 좌표계에서 YZ 평면으로 작업평면 이동



기하형상 생성 (2)



연결선 생성메뉴를 통해 가로, 세로 100 mm 인 직각삼각형 생성

재료 물성 및 특성 입력 (1)

재료

번호 이름 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

선행 탭소성 초탄성 온도 의존

구조

탄성계수 N/mm²
프와송비
질량밀도 kg/mm³

열응력

열팽창계수
참조온도 [T]

열전도

전도율 W/(mm·[T])
비열 J/(kg·[T])
발열계수

안전율 계산 방법

파손 이론
인장 N/mm² 압축 N/mm²

감쇠 지수

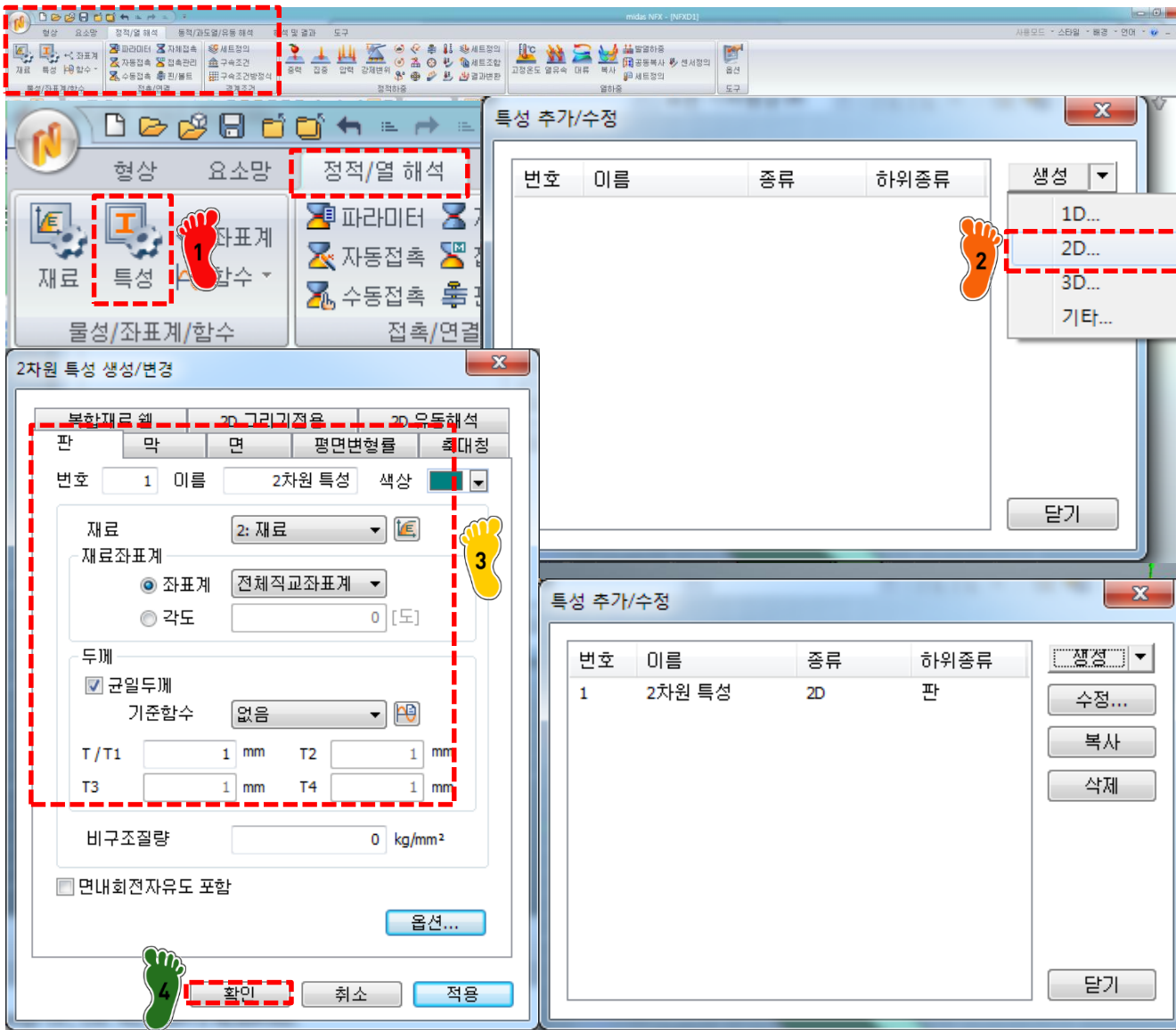
질량 비례 감쇠 계수 1/sec
강성 비례 감쇠 계수 sec
구조 감쇠 계수

불러오기... 편집... 확인 취소 적용



탄성계수 207 GPa
프와송비 0.327
재료 생성

재료 물성 및 특성 입력 (2)



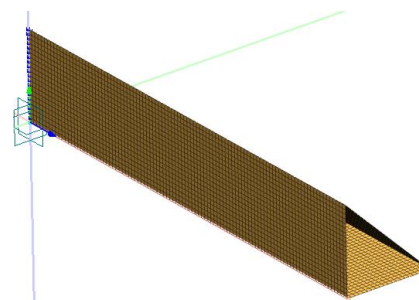
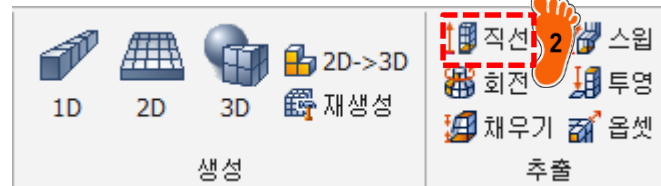
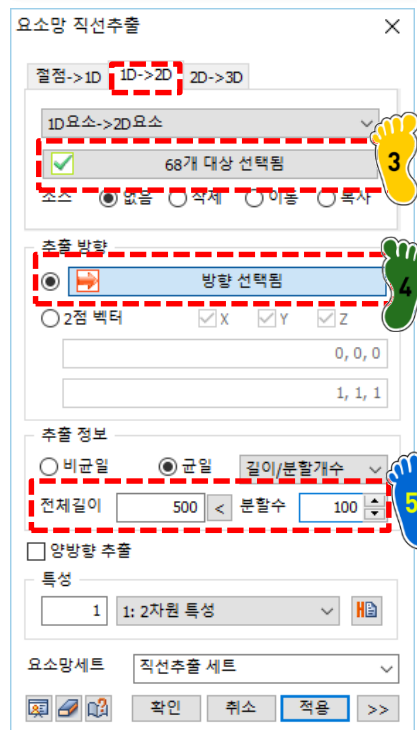
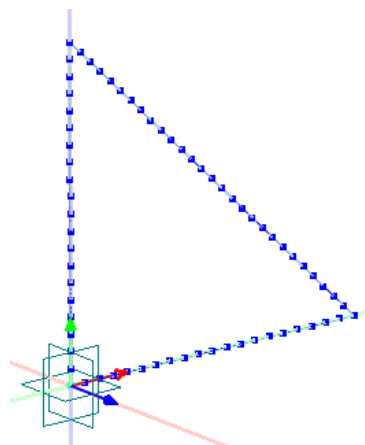
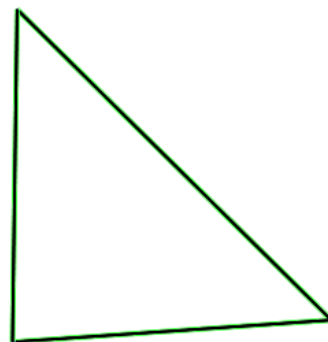
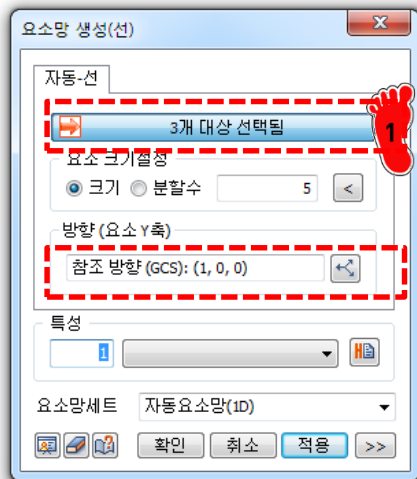
1 정적/열 해석 탭메뉴의 특성 클릭

2 생성, 2D 클릭

3 판 탭메뉴 선택 후 재료 변경
두께 1 mm T/T1 칸에 입력

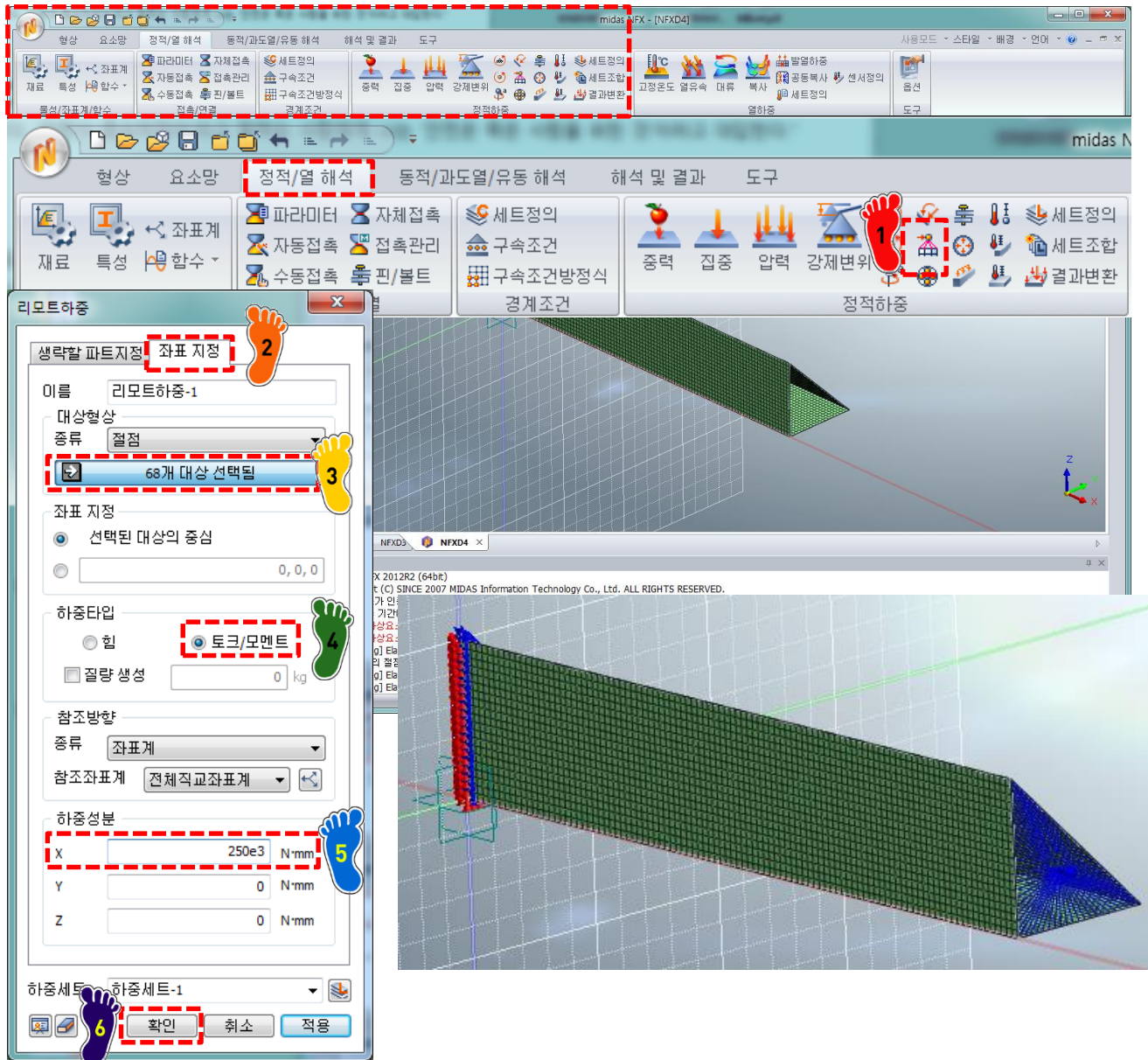
4 확인

요소망 생성



- 1 단면 생성을 위해 만든 선을 선택 후 요소 생성
- 2 요소망 탭에서 '직선' 선택
- 3 생성한 1D 요소를 선택
- 4 확인 2D 요소를 생성할 방향 선택 (길이방향)
- 5 전체길이 및 분할수를 입력하고 확인

하중조건 및 구속조건 설정



1 정적/열 해석 탭 메뉴에서 리모트 하중 클릭

2 좌표 지정 탭 메뉴 선택

3 끝단의 절점 선택

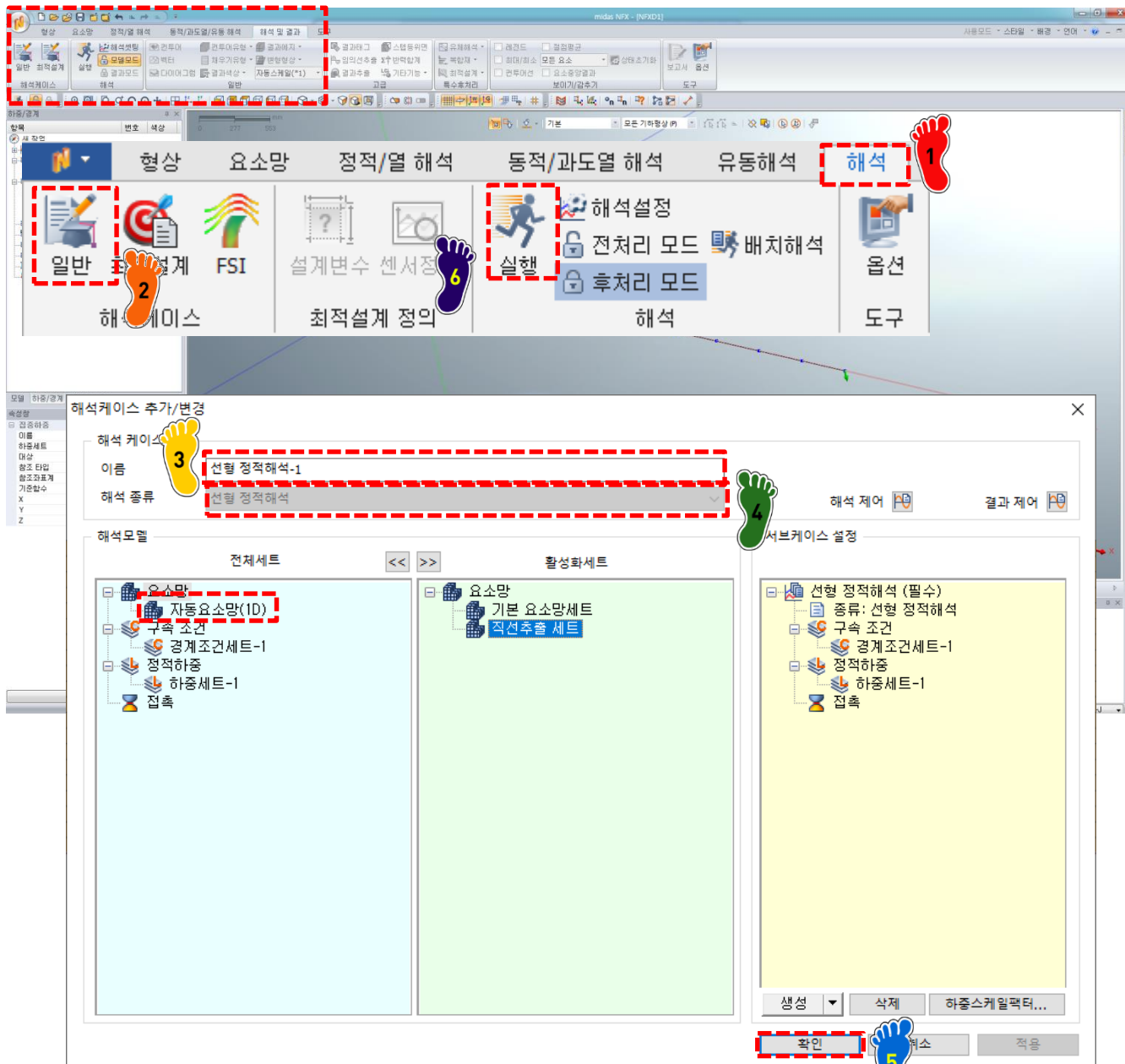
4 토크/모멘트 선택

5 X 방향 250e3 입력

6 확인

고정시킬 절점 선택 후 고정 구속으로 절점 구속

해석 케이스 정의 및 해석 실행



1 주 메뉴 창에서 해석 및 결과 탭메뉴 클릭

2 일반 클릭

3 임의의 이름 입력

4 해석 종류 선형 정적해석 확인

5 확인

6 실행 클릭

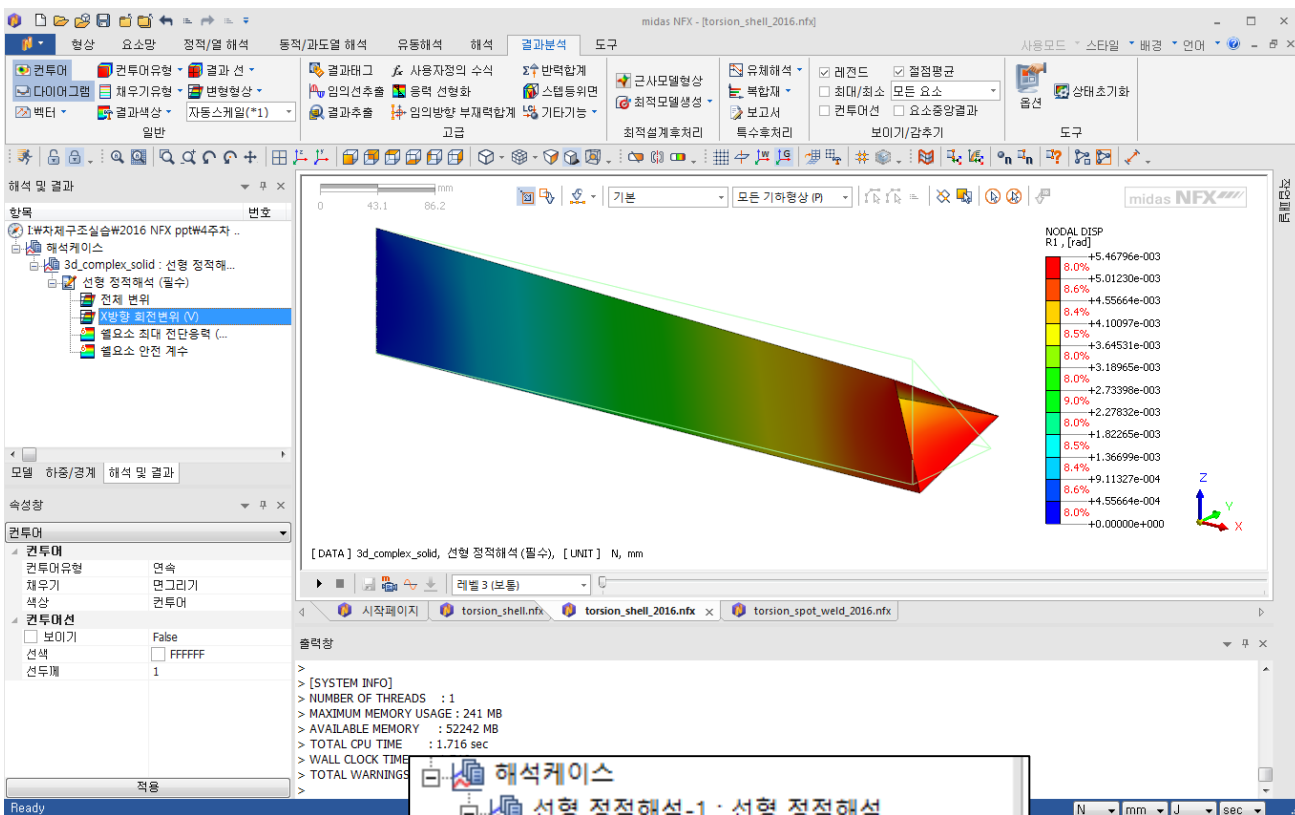


해석 및 결과 창에서

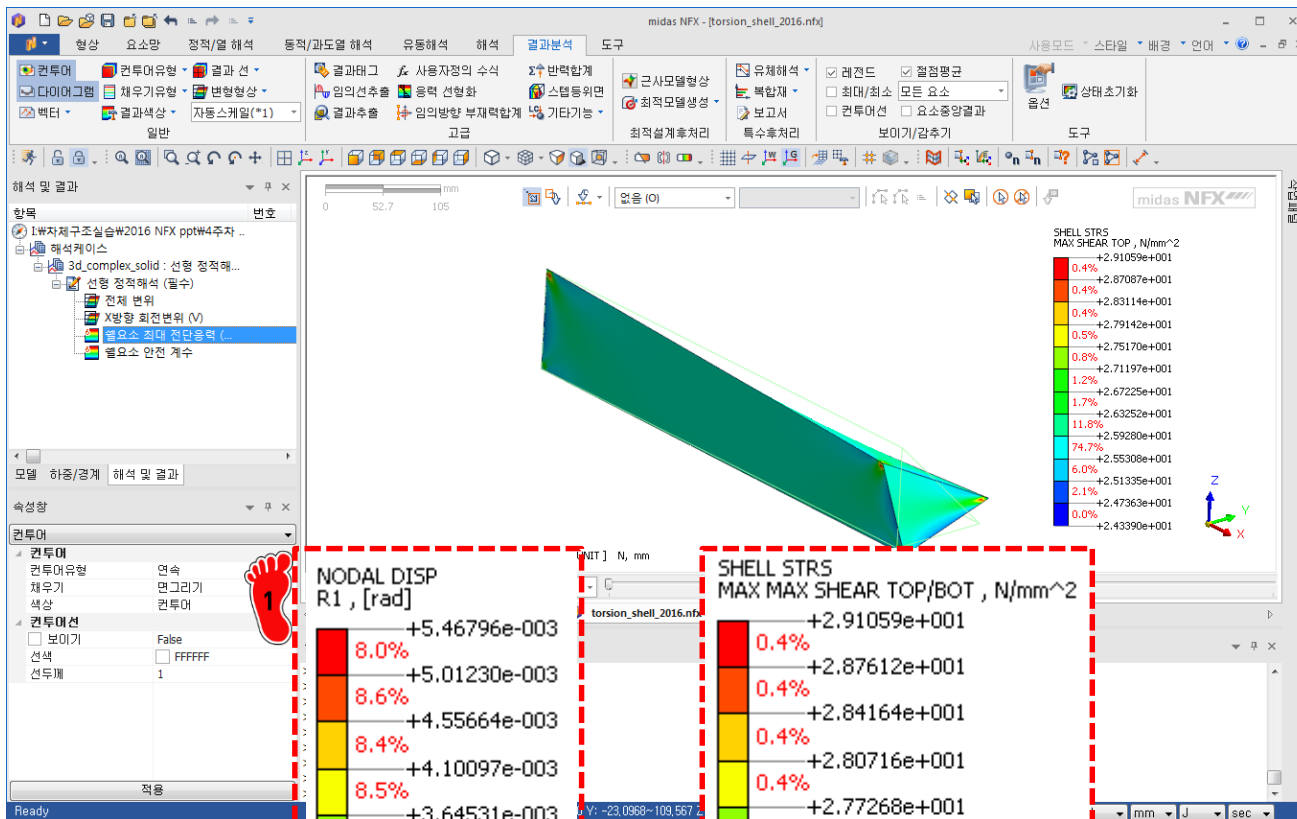
①-스웰요소 상단 최대 전단응력

-X방향 회전변위

결과 추가



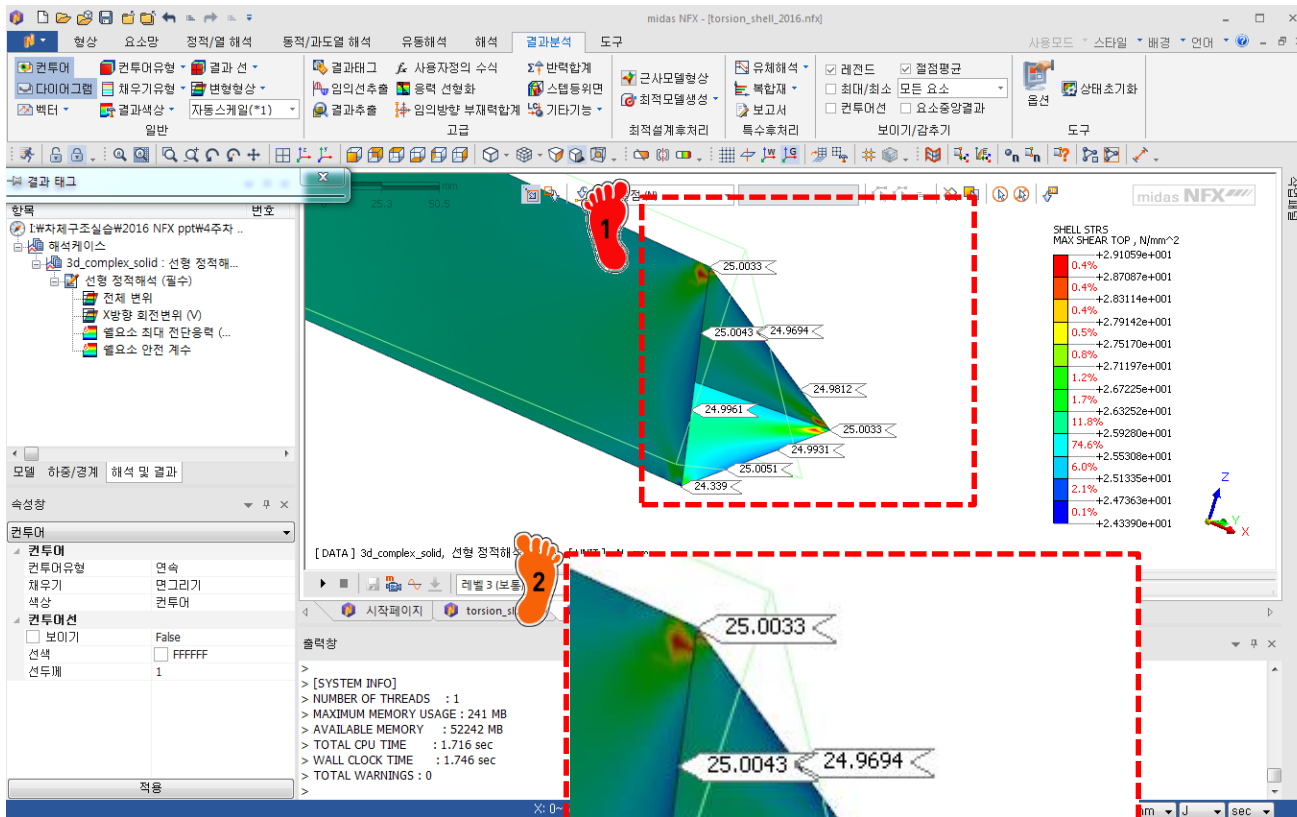
후처리 (2)



회전 변위는 5.46×10^{-3} 으로
오차 0.056% 확인

2 셀 최대 응력은 29.11 MPa
로 오차 16.44% 확인

후처리 (3)

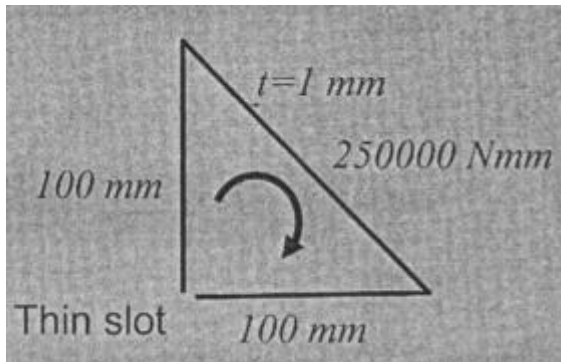


1 응력 집중이 발생하지 않는 지점(축방향 250mm 단면)의 응력 확인

2 응력은 이론값인 25 MPa와 유사한 수준 확인

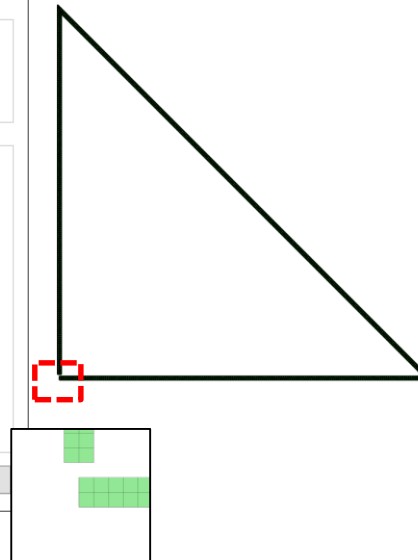
열린 단면인 경우: 단면 정보

Example: Torsion of beam with open section (p.59)



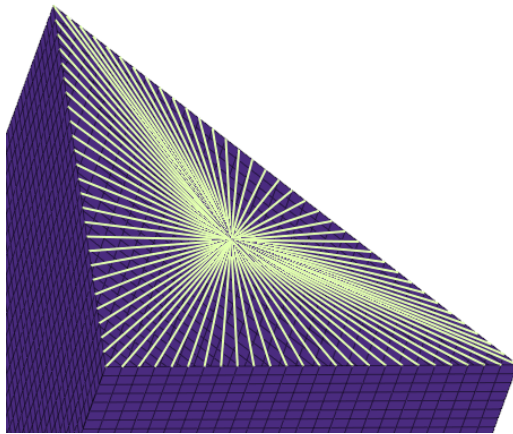
$$J_{EFF} = \frac{1}{3} t^3 S = \frac{1}{3} (1\text{mm})^3 (100\text{mm} + 99\text{mm} + 141.4\text{mm}) = 113.46\text{mm}^4$$

$$\theta = \frac{TL}{GJ_{EFF}} = \frac{(25e4\text{Nmm})(500\text{mm})}{(78e3\text{N/mm}^2)(113.46\text{mm}^4)} = 14.1\text{rad}(803^\circ)$$

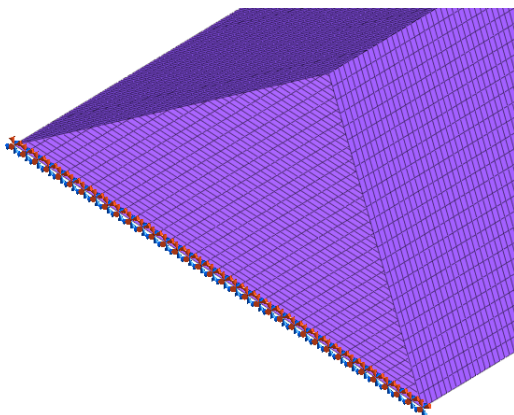


열린 단면인 경우: 해석 결과

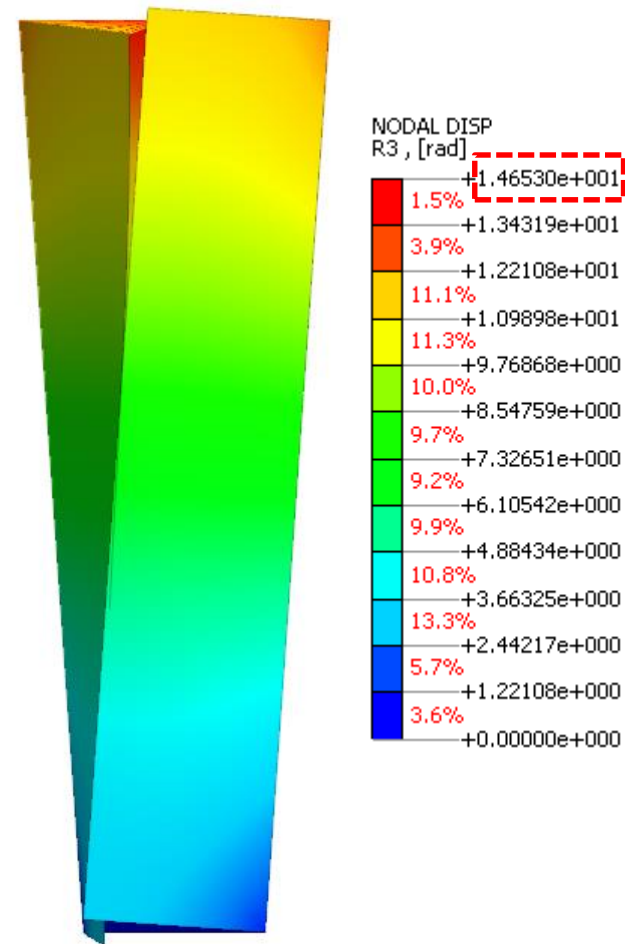
리모트/강체요소(RBE2) 대신 보간요소(RBE3) 사용



길이 방향 변형 허용을 위해 대각선 부분만 고정



회전 변위 결과



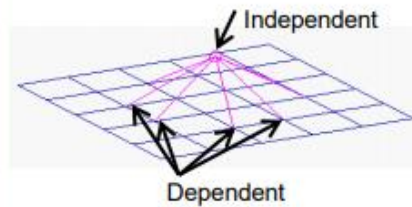
강체요소(RBE2) VS. 보간요소(RBE3)

<RBE2>

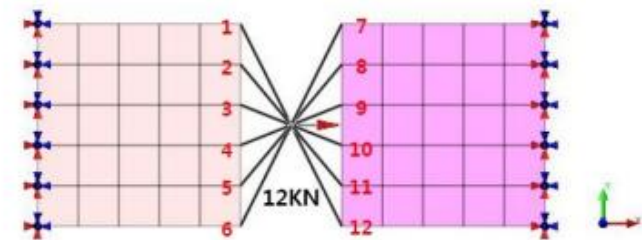


	RBE2	RBE3
정의	연결된 절점들 모두 동일한 변위 및 회전	연결된 절점들에 모두 동일한 하중이 분배
차이점	절점들이 모두 동일한 변위 및 회전을 해야 하므로 각 절점에서 발생하는 MPC Force가 다르다.	동일한 하중이 분배되므로 각 절점에서 발생하는 변위 및 회전이 다르다.

→ 독립 절점의 6자유도 전체가 선택한 종속 절점의 자유도와 연결.

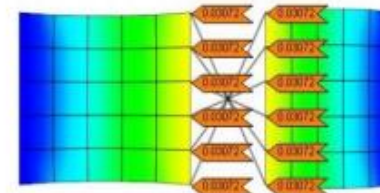


Rigid Body Element

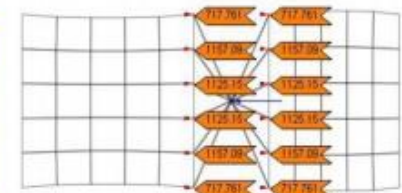


<RBE2 Result>

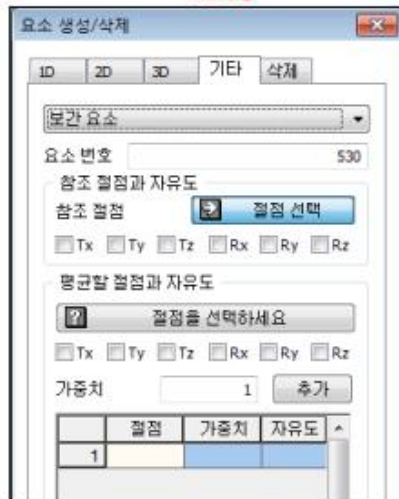
Displacement



MPC Force

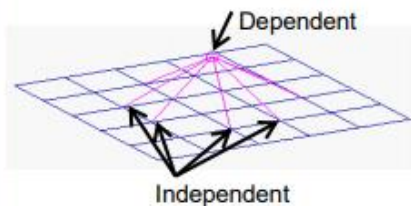


<RBE3>



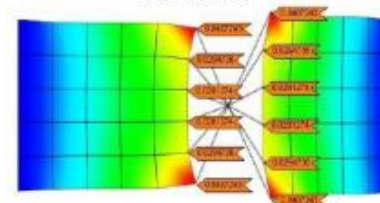
→ 독립 절점과 참조 절점 사이의 자유도 관계에 가중치를 부여하는 기능.

→ 작용하는 하중을 연결되는 여러 지지점에 분산시킬 때 사용.

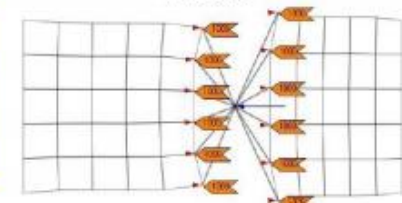


<RBE3 Result>

Displacement



MPC Force

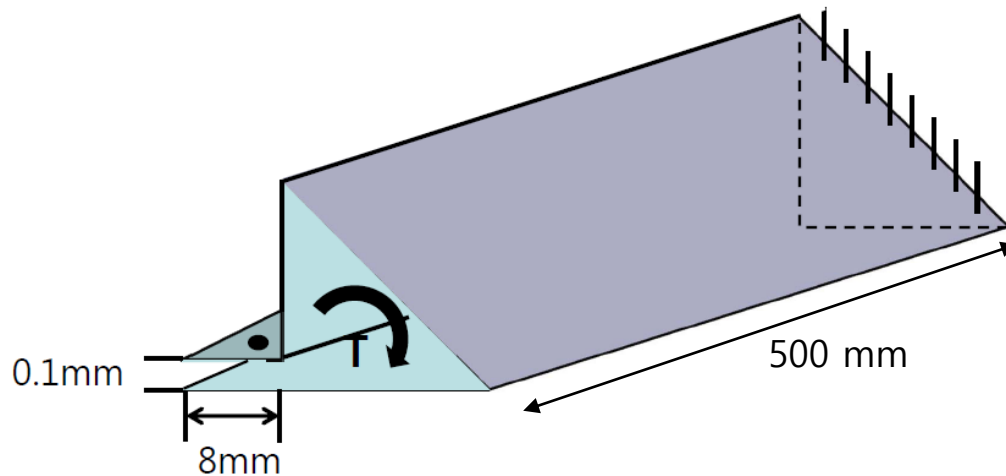


SPOT WELD FLANGE

셸 요소

예제: SPOT WELD FLANGE

비틀림 강성을 계산하시오



재료 물성

- $E = 207 \text{ GPa}$

- $\nu = 0.327$

입력 하중

- $T = 250 \text{ kNmm}$

$$K = \frac{T}{\theta} = \frac{(\text{stiffness of closed tube w/o weld flange})}{\left[1 + \frac{3}{4\pi^2(1+\nu)} \frac{p^2}{wS} \right]}$$

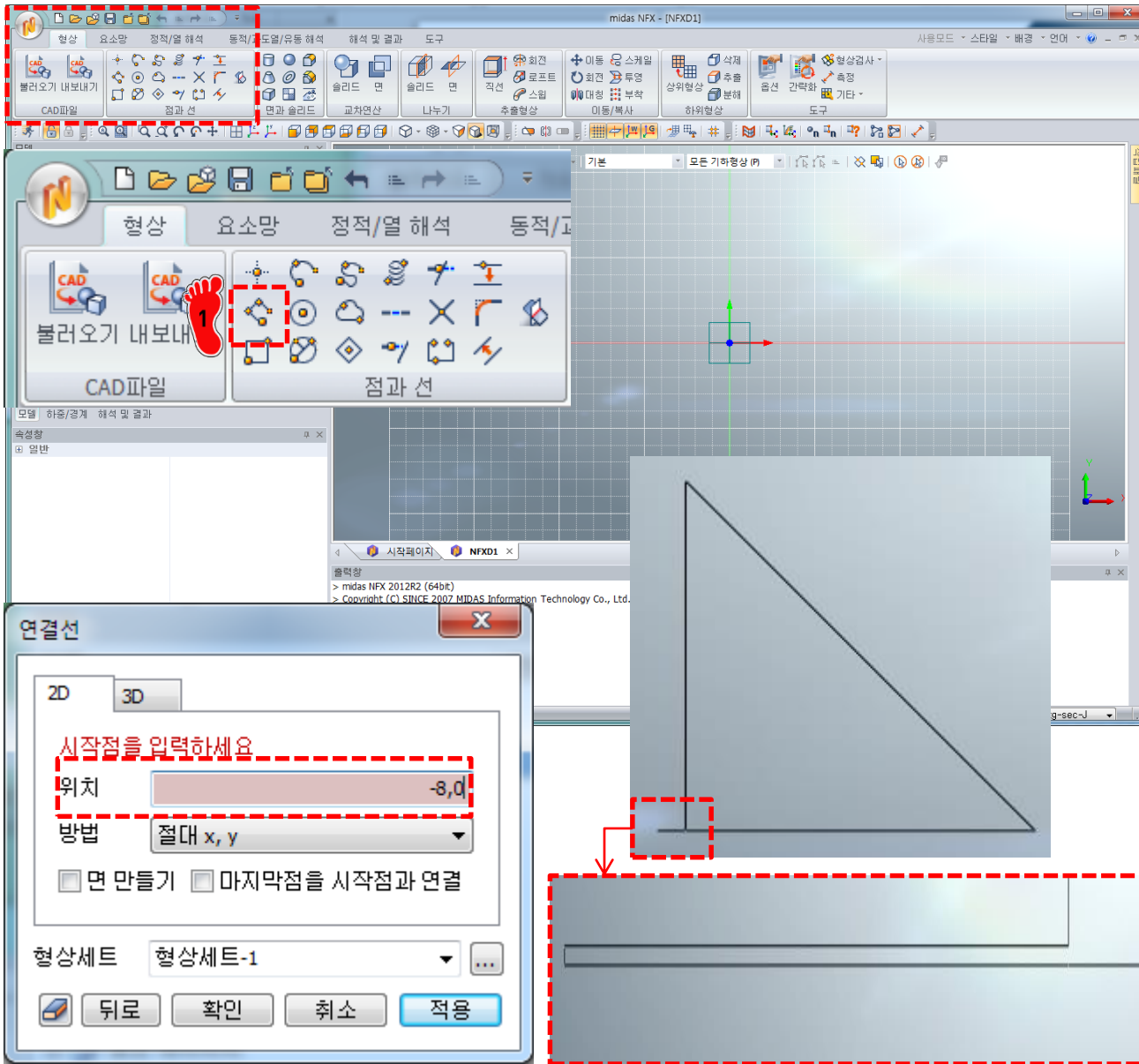
if $p = 80\text{mm}$

$$\psi = \frac{1}{1 + \frac{3}{4\pi^2(1+\nu)} \frac{p^2}{wS}} = \frac{1}{1 + \frac{3}{4\pi^2(1+0.327)} \frac{80^2}{8(200+100\sqrt{2})}} = 0.882$$

$$\theta_{p=80} = \theta \times \frac{1}{\psi} = 5.471 \times 10^{-3} \times \frac{1}{0.882} = 6.205 \times 10^{-3} \text{ rad}$$

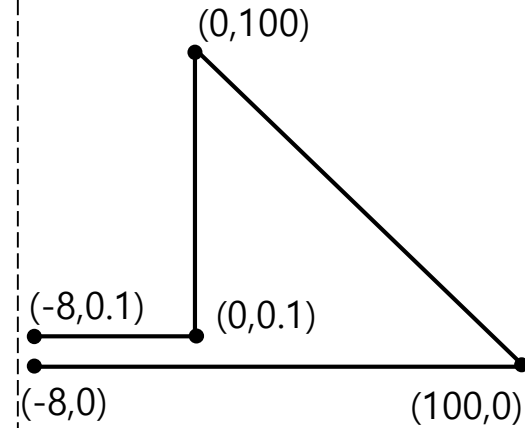
$$K_{p=80} = K \times \psi = 45.704 \times 0.882 = 40.297 \text{ Nm/rad}$$

단면형상 생성



1 연결선을 클릭한 후 예제에서 주어진 치수대로 열린 단면 생성

또는 포인트를 생성하여 연결



점

생성 테이블 입력

	X	Y	Z
1	100.000	0.0000	0.0000
2	0.0000	100.000	0.0000
3	0.0000	0.1000	0.0000
4	-8.0000	0.1000	0.0000
5	-8.0000	0.0000	0.0000
6			

6을 활성화 시켜야 5까지 생성됨

형상세트 형상세트-1

확인 취소 적용

재료 물성 및 특성 입력 (1)

재료

번호 이름 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

선형 탄소성 초탄성 온도 의존

구조

탄성계수 N/mm²
프와송비
질량밀도 kg/mm³

열응력

열팽창계수
참조온도 [T]

열전도

전도율 W/(mm·[T])
비열 J/(kg·[T])
발열계수

안전율 계산 방법

파손 이론
인장 N/mm² 압축 N/mm²

감쇠 지수

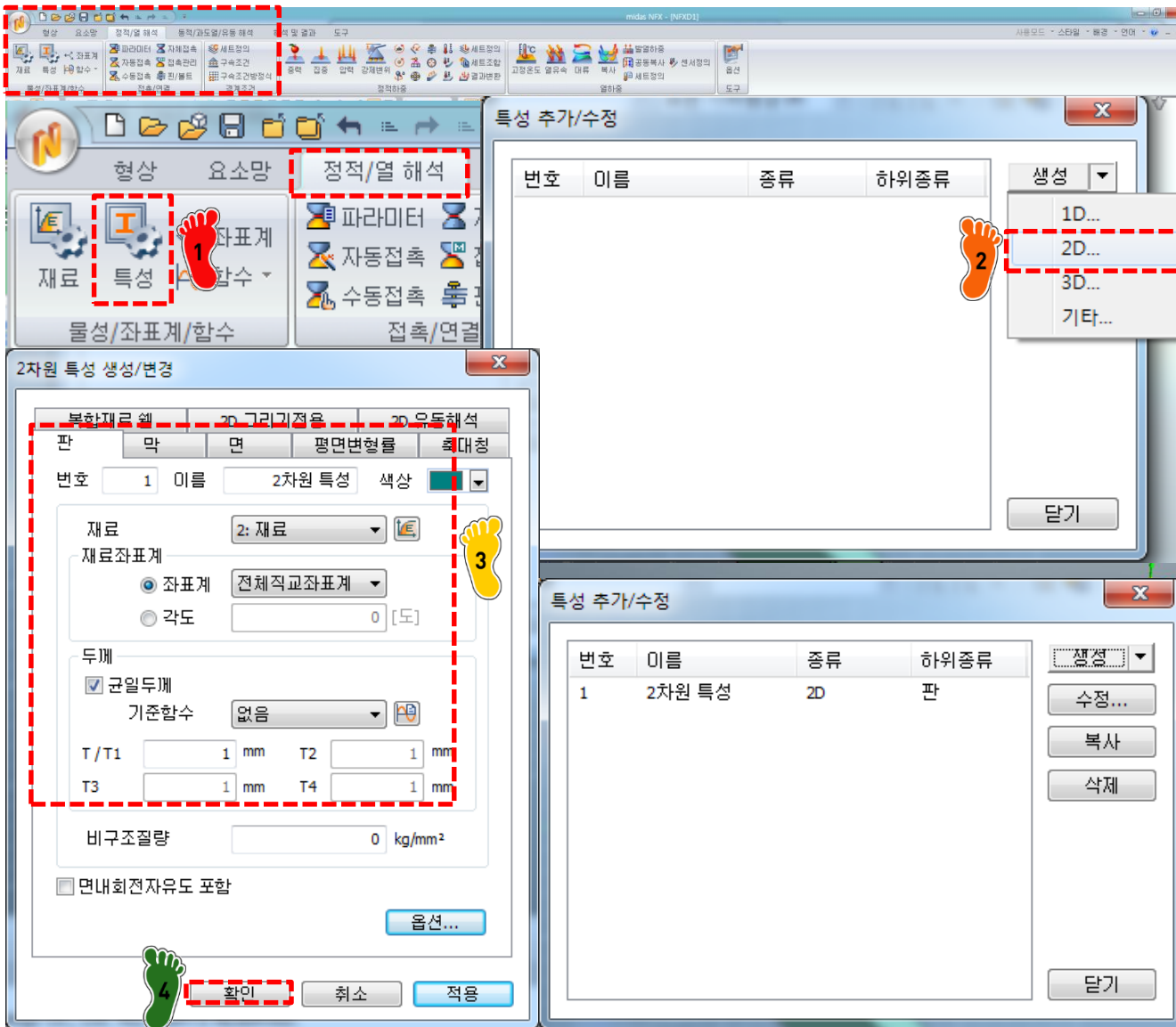
질량 비례 감쇠 계수 1/sec
강성 비례 감쇠 계수 sec
구조 감쇠 계수

불러오기... 편집... 확인 취소 적용



탄성계수 207 GPa
프와송비 0.327
재료 생성

재료 물성 및 특성 입력 (2)



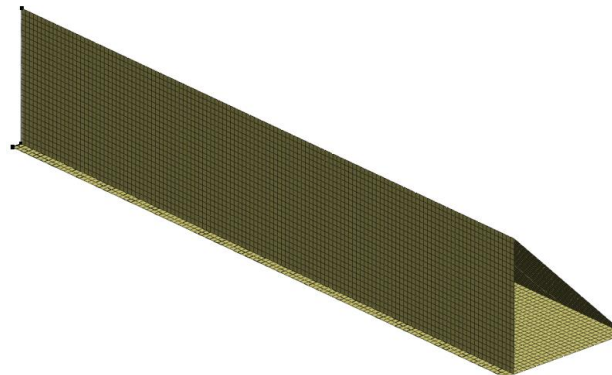
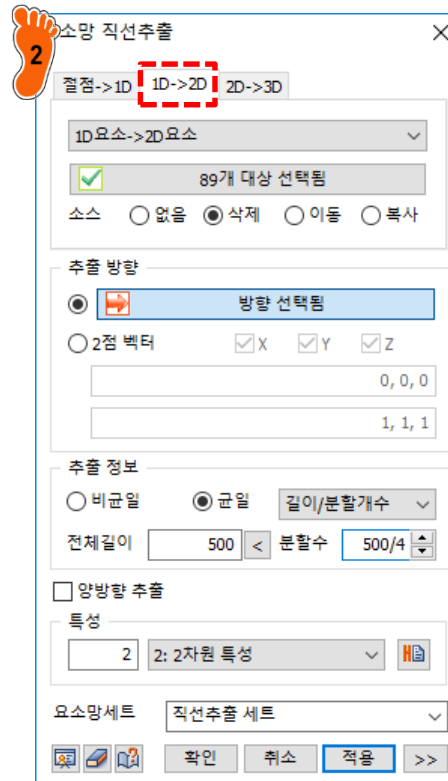
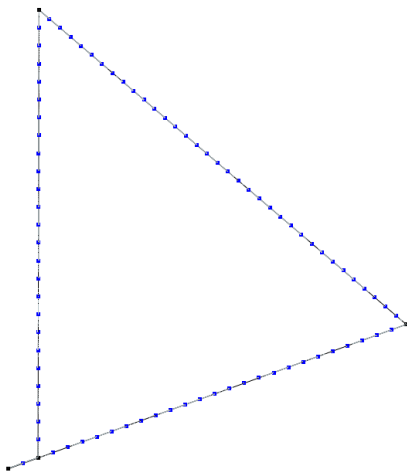
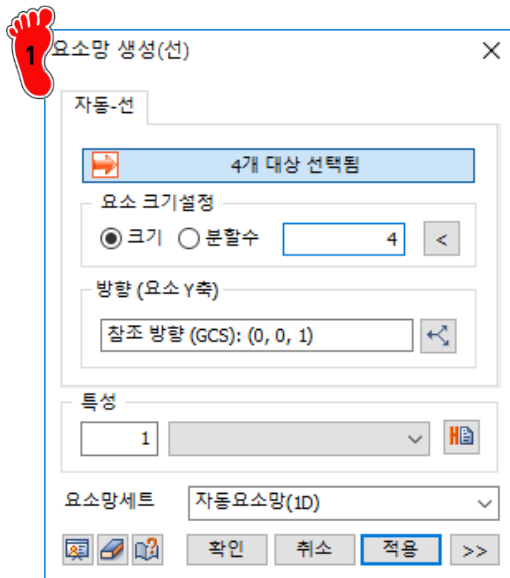
1 정적/열 해석 탭메뉴의 특성 클릭

2 생성, 2D 클릭

3 판 탭메뉴 선택 후 재료 변경 두께 1 mm T/T1 칸에 입력

4 확인

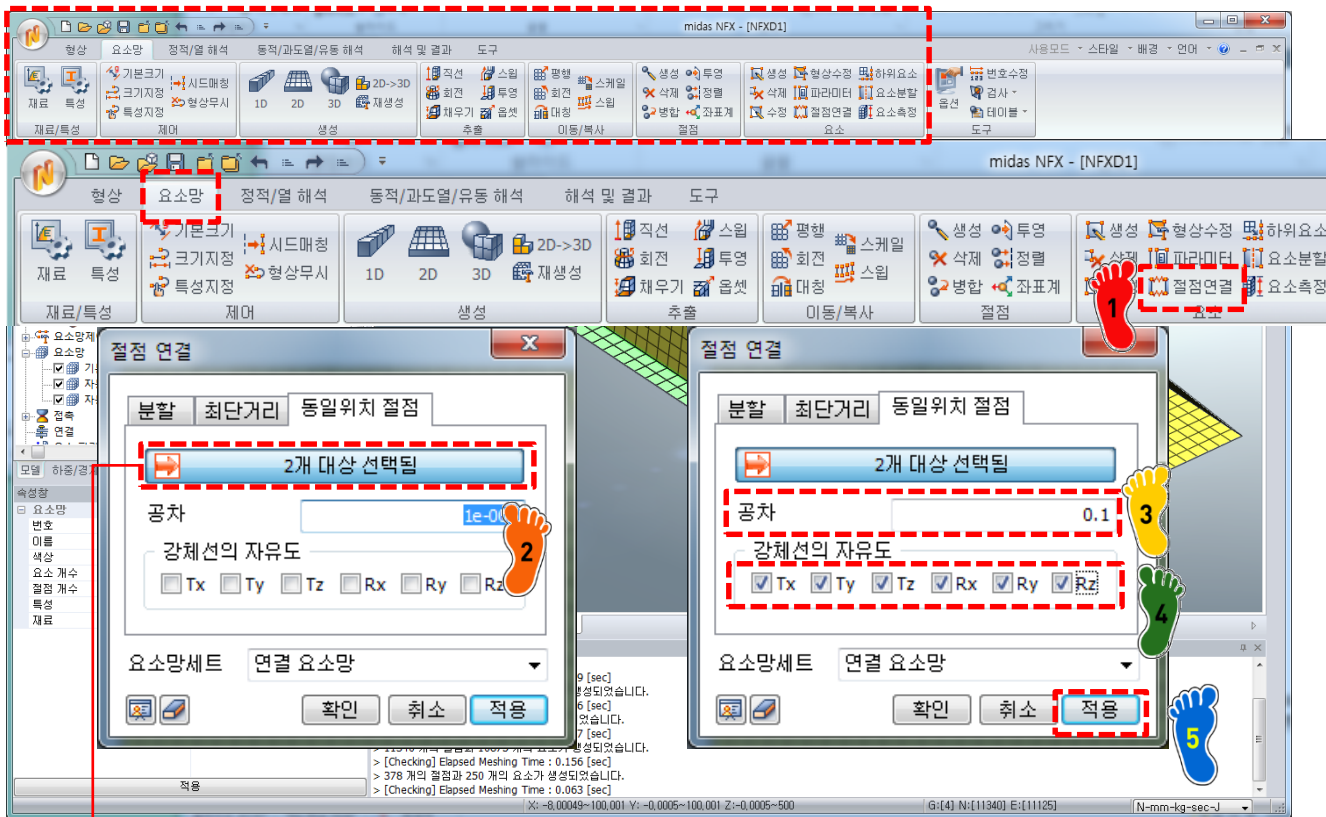
요소망 생성 (1)



1 크기 4mm로 1D 요소망 생성

2 길이 500mm, 분할수 500/4로 2D 요소 직선 추출

요소망 생성 (2)



1 요소망 탭의 절점연결 클릭

2 동일위치 절점 탭 클릭 후 용접하려는 2면이 겹치게 보이도록 시점을 이동한 뒤, 모델창을 이용하여 용접점을 1쌍씩 선택

3 용접면 사이의 거리 (0.1 mm)를 공차로 입력

4 자유도 전부 선택

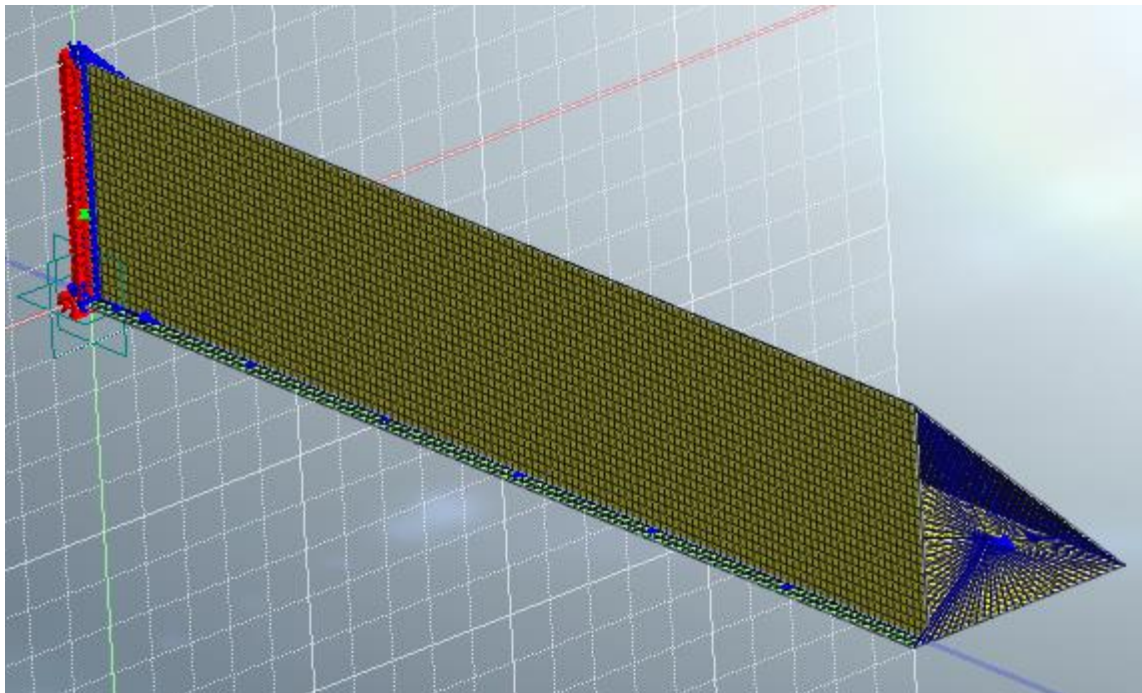
5 적용

80 mm 단위로 나머지 뒷 부분에도 절점 연결

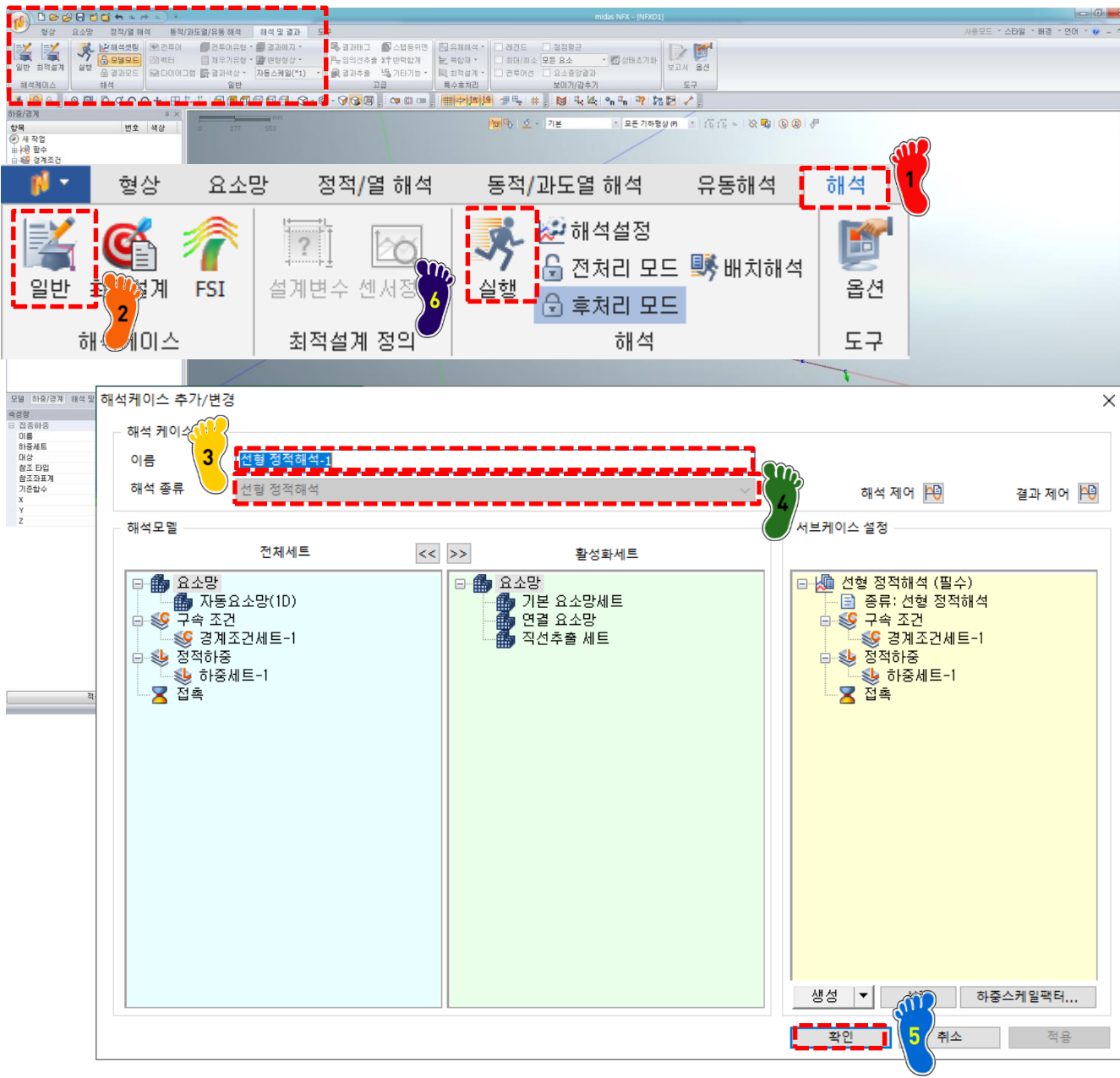
구속조건 및 하중조건 설정



전 예제와 동일한 방식으로
구속조건 및 하중조건 설정
(고정구속, 길이방향
250e3Nmm 토크)



해석 케이스 정의 및 해석 실행



1 주 메뉴 창에서 해석 및 결과 탭메뉴 클릭

2 일반 클릭

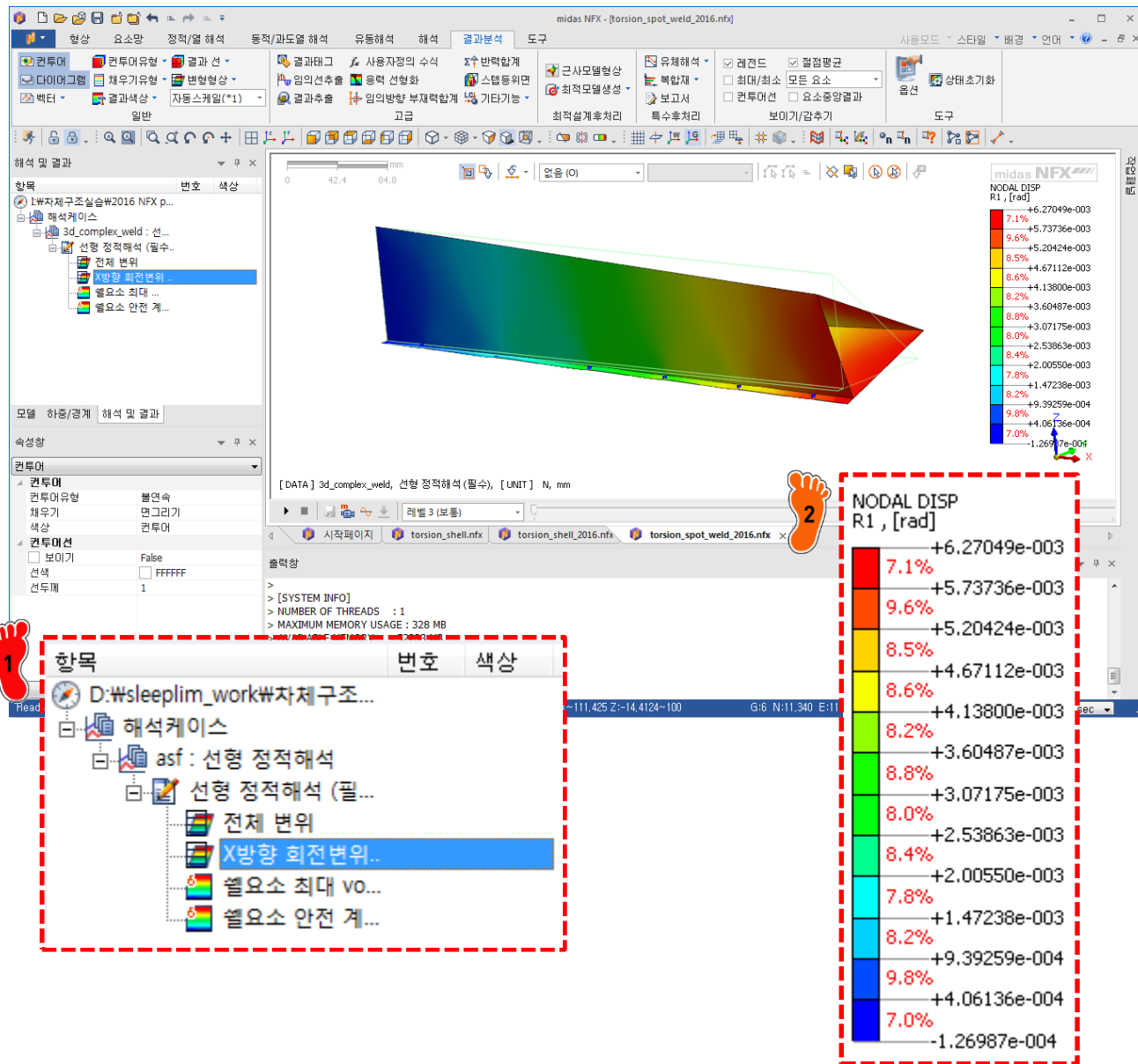
3 임의의 이름 입력

4 해석 종류 선형 정적해석 확인

5 확인

6 실행 클릭

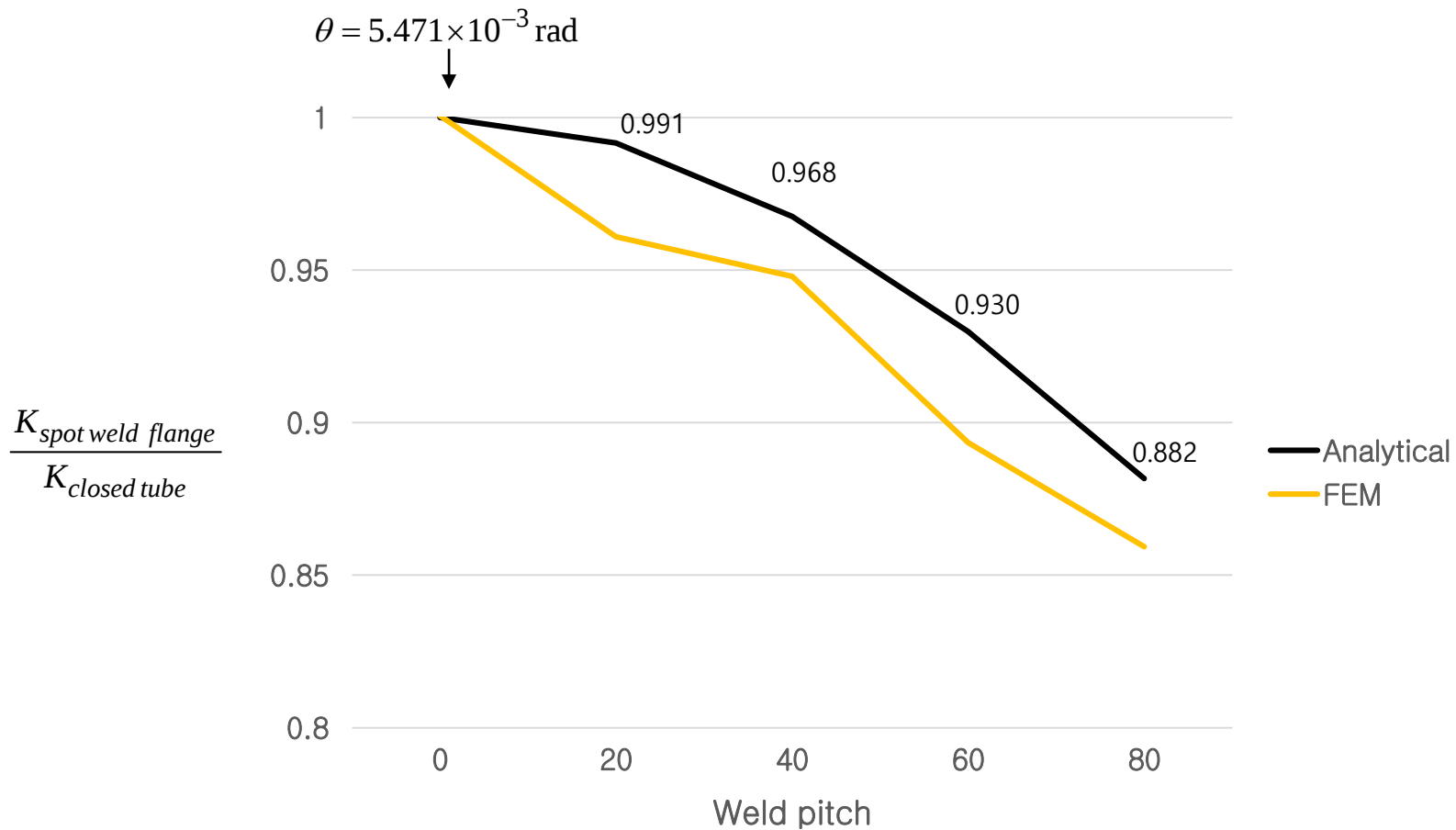
후처리



1 해석 및 결과 창에서
'X방향(길이방향) 회전변위'
결과 추가

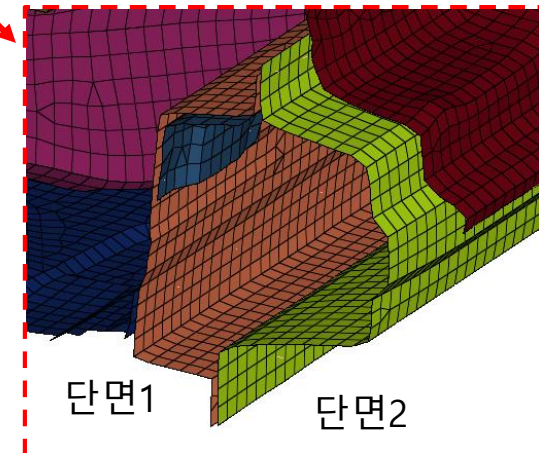
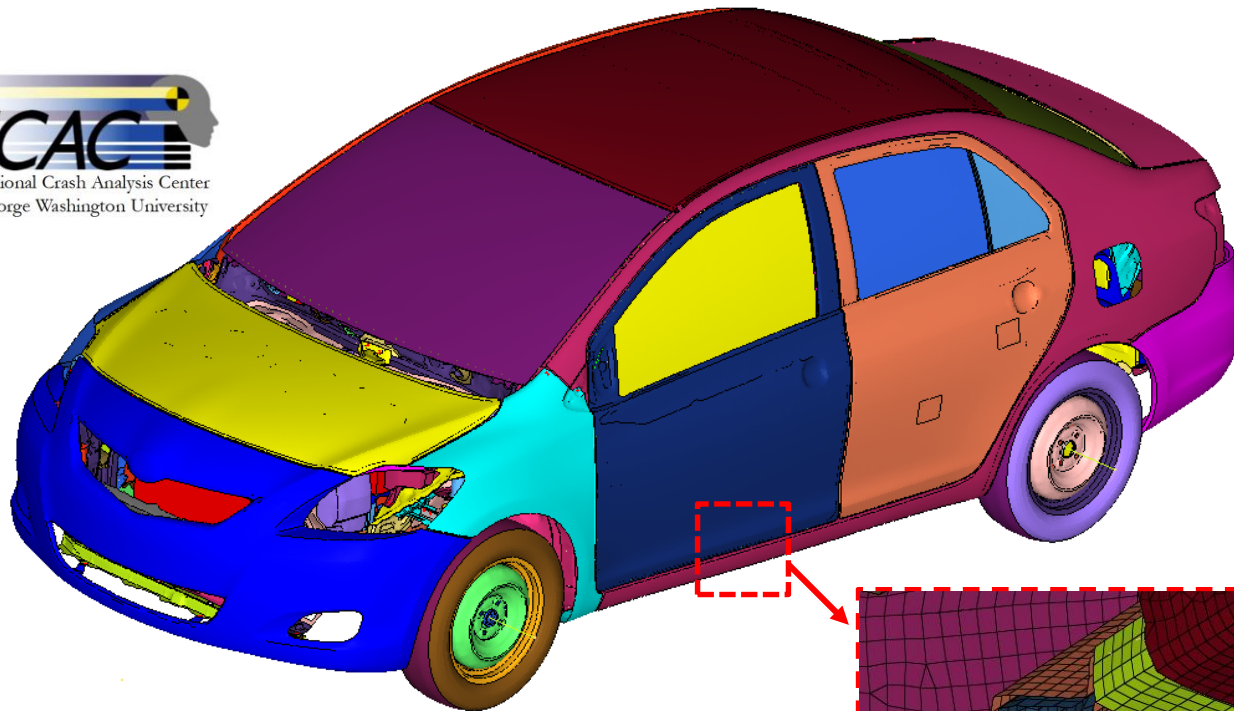
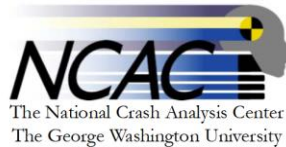
2 결과는 6.207e-3으로 이론
결과와 오차 0.032% 확인
(용접 위치에 따라 다를 수
있음)

연습문제 1: 용접 거리에 따른 영향



연습문제 2

Toyota Yaris 모델의 rocker 단면 해석 (용접 거리에 따른 굽힘/비틀림 영향 확인)
(빔의 길이는 800 mm, 요소 크기는 8 mm 로 적용)



	두께	Young's modulus
단면1	1.412 mm	200GPa
단면2	1.432 mm	

숙제

해석적인 방법과 유한요소 프로그램으로 다음 문제의 비틀림 강성을 계산하시오
용접 거리에 따른 비틀림 강성을 구하고 해석적인 결과와 비교 분석하시오

재료 물성 및 하중은 예제와 동일

