비선형 동해석

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

Copyright © Computational Design Lab. All rights reserved.

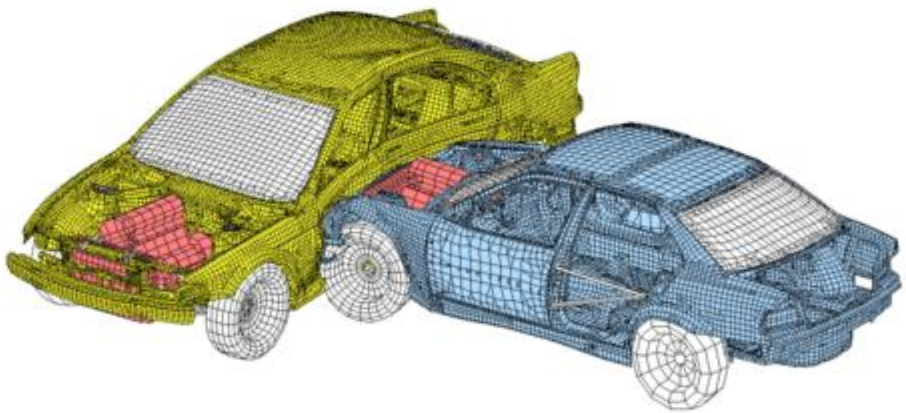
목차

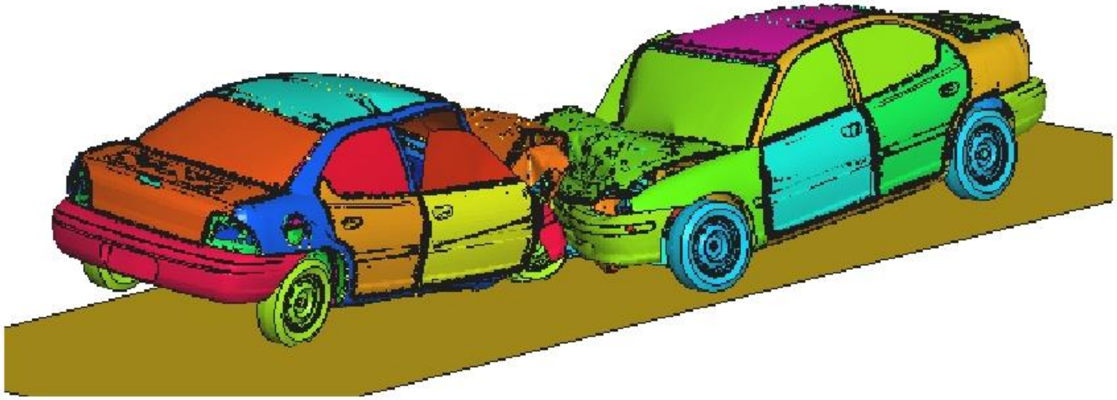
- 예제 문제
  - Crash analysis
  - Beam crush analysis
- 해석 프로세스
  - 기하형상 생성
  - 재료 물성 및 특성 입력
  - 요소망 생성
  - 구속조건 설정
  - 하중조건 설정
  - 해석케이스 정의 및 해석 실행
  - 후처리

Copyright © Computational Design Lab. All rights reserved.

INTRODUCTION (1)

Crash analysis of body structure

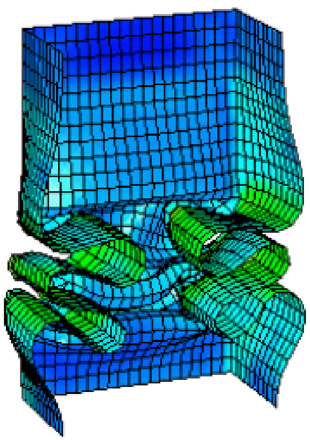




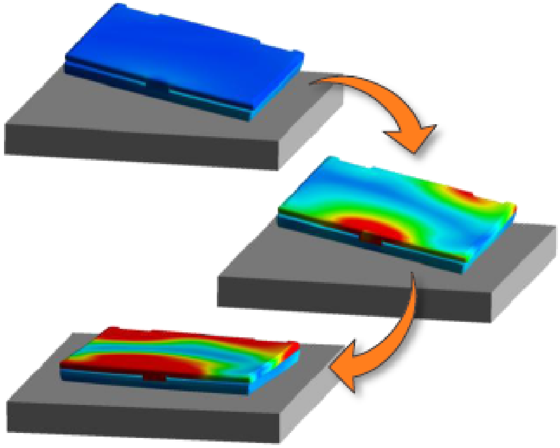
Copyright © Computational Design Lab. All rights reserved.

INTRODUCTION (2)

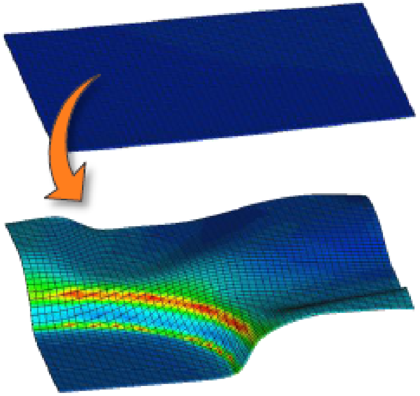
- 육면체, **고차사면체**, **피라미드** 등 다양한 요소 지원으로 **편리하고 정확한 해석**
- **재료비선형**: 탄소성 모델, **초탄성 모델 (Mooney-Rivlin, Ogden, Blatz-Ko 등)**
- **기하비선형**: 대변형, 대회전, 종동력
- **접촉비선형**: 면-면 접촉/**단일면 접촉**, 슬라이딩/거친/**일반접촉 (마찰지원)**
- 다양한 **질량 스케일**/감쇠와 요소별 안전 시간스텝의 자동계산 지원
- **내연적 (Implicit) 해석과 순차적 연계해석**으로 성형/가공해석 등 다양한 활용



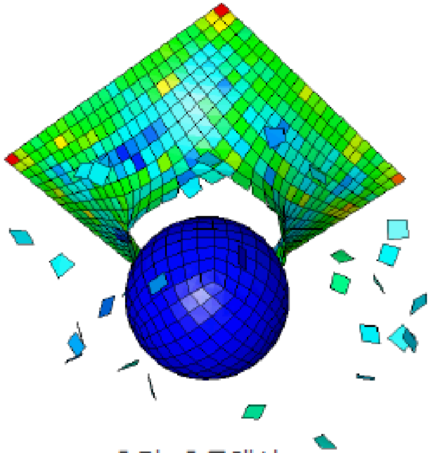
충격시 박스의 좌굴해석



노트북의 낙하해석



쉘 양면접촉과 **연계해석**을 활용한
프레스 성형해석 (스프링백 고려)



충격/충돌해석

Copyright © Computational Design Lab. All rights reserved.

INTRODUCTION (3)

표 7.7.1 암시적(Implicit)과 외연적(Explicit) 적분 알고리즘 비교

암시적(Implicit) 적분 알고리즘	외연적(Explicit) 적분 알고리즘
• 선형 과도응답해석의 경우 큰 시간 스텝을 적용할 수 있음 • 비선형 과도응답해석의 경우 수렴성 확보를 위해 작은 시간 스텝을 사용해야 하는 단점이 있음 • 대규모 모델인 경우에는 메모리 사용량 및 하드디스크 용량의 제한이 있을 수 있음	• 수렴성에 대한 문제 없이 해가 구해짐 • 소규모 모델인 경우에는 암시적 방법에 비해 해석 시간이 좀 더 많이 소요되나 대규모 모델에서는 상대적으로 유리함 • 시간 간격은 항상 임계 시간 간격보다 작은 값으로 정의

$$f(x_{n+1}, x_n, \dots) = 0 \qquad\qquad x_{n+1} = f(x_n, \dots)$$

Copyright © Computational Design Lab. All rights reserved.

INTRODUCTION (4)

- 내연적 시간 적분법 (HHT-α 이용: Newmark 방법의 일반화된 형태)
  1. 동적 평형방정식으로부터 구한 불평형력을 최소화 하는 방향으로 진행

     동적 평형방정식: $\mathbf{Ma}^{n+1} + (1+\alpha_H)\left[\mathbf{Cv}^{n+1} + \mathbf{f}^{\text{int},n+1} - \mathbf{f}^{ext,n+1}\right] - \alpha_H\left[\mathbf{Cv}^{n} + \mathbf{f}^{\text{int},n} - \mathbf{f}^{ext,n}\right] = \mathbf{0}$

     불평형력: $\mathbf{g}_{n+1} = \mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}_{n+1} + (1+\alpha_H)\left(\mathbf{C}_{n+1}\dot{\mathbf{u}}_{n+1} + \mathbf{f}_{\text{int},n+1} - \mathbf{f}_{ext,n+1}\right) - \alpha_H\left(\mathbf{C}_n\dot{\mathbf{u}}_n + \mathbf{f}_{\text{int},n} - \mathbf{f}_{ext,n}\right)$

  2. 변위 및 가속도 계산

$$\mathbf{v}^{n+1} = \mathbf{v}^n + \Delta t\left[\gamma\mathbf{a}^{n+1} + (1-\gamma)\mathbf{a}^n\right]$$

$$\mathbf{u}^{n+1} = \mathbf{u}^n + \Delta t\mathbf{v}^n + \frac{1}{2}\Delta t^2\left[2\beta\mathbf{a}^{n+1} + (1-2\beta)\mathbf{a}^n\right]$$

  3. 평형방정식 재구성

$$\mathbf{K}^{eff}\mathbf{u}_{n+1} = \mathbf{f}^{eff}$$

$$\mathbf{K}^{eff} = \frac{1}{\beta\Delta t^2}\mathbf{M} + \frac{(1+\alpha_H)\gamma}{\beta\Delta t}\mathbf{C} + (1+\alpha_H)\mathbf{K},$$

$$\mathbf{f}^{eff} = -\mathbf{f}^{\text{int},0} + (1+\alpha_H)\left[\mathbf{f}^{ext,n+1} + \mathbf{f}^{nonmech,n+1}\right] - \alpha_H\left[\mathbf{f}^{ext,n} + \mathbf{f}^{nonmech,n}\right] +$$

$$\mathbf{M}\left[\frac{1}{\beta\Delta t^2}\mathbf{u}^n + \frac{1}{\beta\Delta t}\mathbf{v}^n + \left(\frac{1}{2\beta} - 1\right)\mathbf{a}^n\right] +$$

$$\mathbf{C}\left[\frac{(1+\alpha_H)\gamma}{\beta\Delta t}\mathbf{u}^n + \left\{\frac{(1+\alpha_H)\gamma}{\beta} - 1\right\}\mathbf{v}^n + \Delta t(1+\alpha_H)\left(\frac{\gamma}{2\beta} - 1\right)\mathbf{a}^n\right] + \alpha_H\mathbf{K}\mathbf{u}^n$$

Copyright © Computational Design Lab. All rights reserved.

INTRODUCTION (5)

- 외연적 시간 적분법 (중앙차분법 이용)

1. 시간 스텝을 n+1/2과 n, n+1 스텝으로 구분

$$\Delta t^{n+1/2} = t^{n+1} - t^{n},\ t^{n+1/2} = \frac{1}{2}\left(t^{n+1} + t^{n}\right),\ \Delta t^{n} = t^{n+1/2} - t^{n-1/2}$$

2. 스텝 n+1 에서의 변위는 n+1/2 스텝에서의 속도로부터 계산

$$\dot{\mathbf{u}}^{n+1/2} = \mathbf{v}^{n+1/2} = \frac{1}{\Delta t^{n+1/2}}\left(\mathbf{u}^{n+1} - \mathbf{u}^{n}\right),\quad \mathbf{u}^{n+1} = \mathbf{u}^{n} + \Delta t^{n+1/2}\mathbf{v}^{n+1/2}$$

3. 스텝 n+1/2 에서의 속도는 n 스텝에서의 가속도로부터 계산

$$\ddot{\mathbf{u}}^{n} = \mathbf{a}^{n} = \frac{1}{\Delta t^{n}}\left(\mathbf{v}^{n+1/2} - \mathbf{v}^{n-1/2}\right),\quad \mathbf{v}^{n+1/2} = \mathbf{v}^{n-1/2} + \Delta t^{n}\mathbf{a}^{n}$$

4. n 스텝의 가속도 a 는 공간상의 이산화를 통해 계산

$$\mathbf{M}\mathbf{a}^{n} = \mathbf{f}^{n} = \mathbf{f}^{ext}(\mathbf{u}^{n}, t^{n}) - \mathbf{f}^{\text{int}}(\mathbf{u}^{n}, t^{n}),\ \mathbf{a}^{n} = \mathbf{M}^{-1}\left(\mathbf{f}^{ext}(\mathbf{u}^{n}, t^{n}) - \mathbf{f}^{\text{int}}(\mathbf{u}^{n}, t^{n})\right)$$

5. 1~4과정 반복

- 외연적 시간 적분법의 임계 시간스텝

해석 모델에 포함된 모든 요소의 안정시간스텝 중 가장 작은 값을 기준으로 계산

$$\Delta t = \alpha \Delta t_{crit},\quad \Delta t_{crit} = \frac{2}{\omega_{\max}} \le \min_{e}\left\{\Delta t_{e}\right\}\qquad \Delta t_{e} = \frac{2}{\omega_{\max}^{e}} = \min\left\{\frac{L_e}{c_d}\right\}$$

$\omega_{\max}$ 는 선형화된 시스템 전체의 최대 주파수

L_e 는 요소의 특성길이

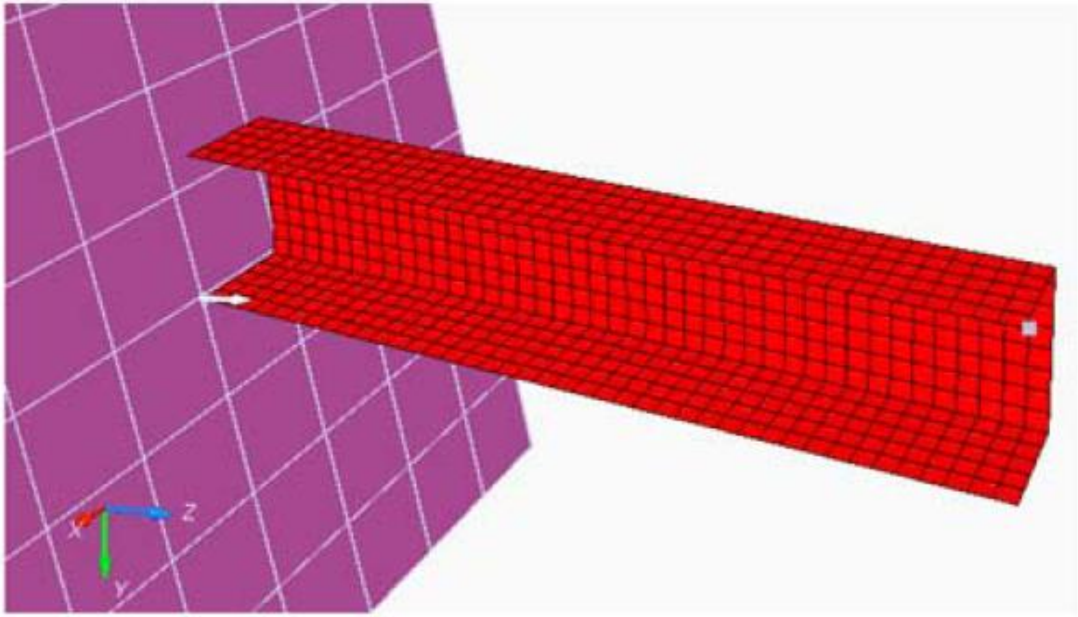
c_d 는 팽창파 속도 $\quad c_d = \sqrt{\frac{M}{\rho}} = \sqrt{\frac{K + 4\mu/3}{\rho}}$

Copyright © Computational Design Lab. All rights reserved.

예제: BEAM CRASH ANALYSIS (1)

Simulate buckling of a tube using half tube mesh with symmetric boundary conditions.

The figure illustrates the structural model used for this tutorial: a half tube with a rectangular section (38.1 x 25.4 mm) and length of 203 mm.



Model

- The tube thickness is 0.914 mm.

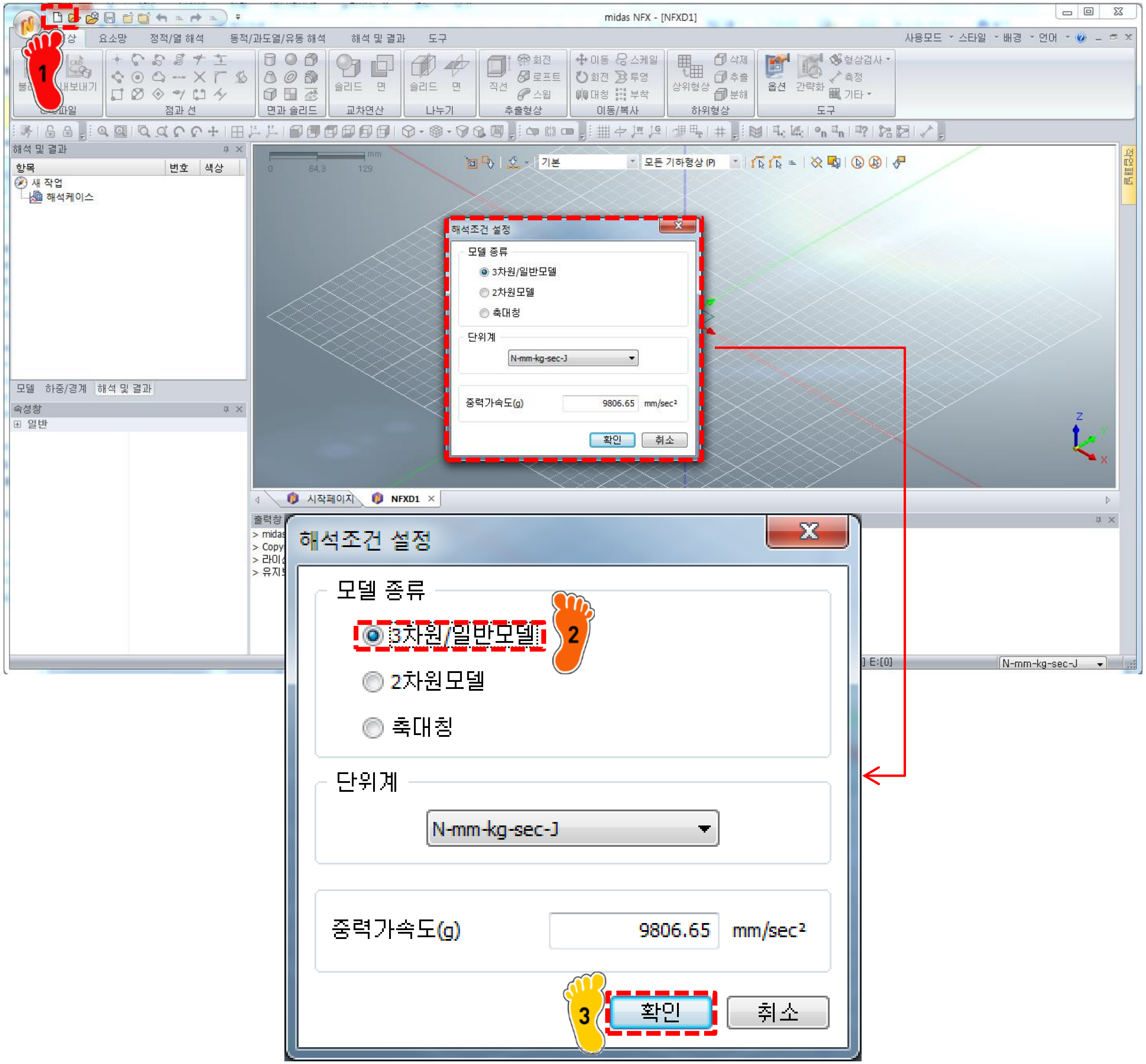
- $\rho = 7.85e^{-6}$ Kg/mm^3 Initial density
- E = 210 GPa Young's modulus
- ν = 0.33 Poisson coefficient
- σ_0 = 0.206 GPa [a] Yield Stress

Copyright © Computational Design Lab. All rights reserved.

BEAM CRASH EXAMPLE
쉘 요소

Copyright © Computational Design Lab. All rights reserved.

기하형상 생성 (1)



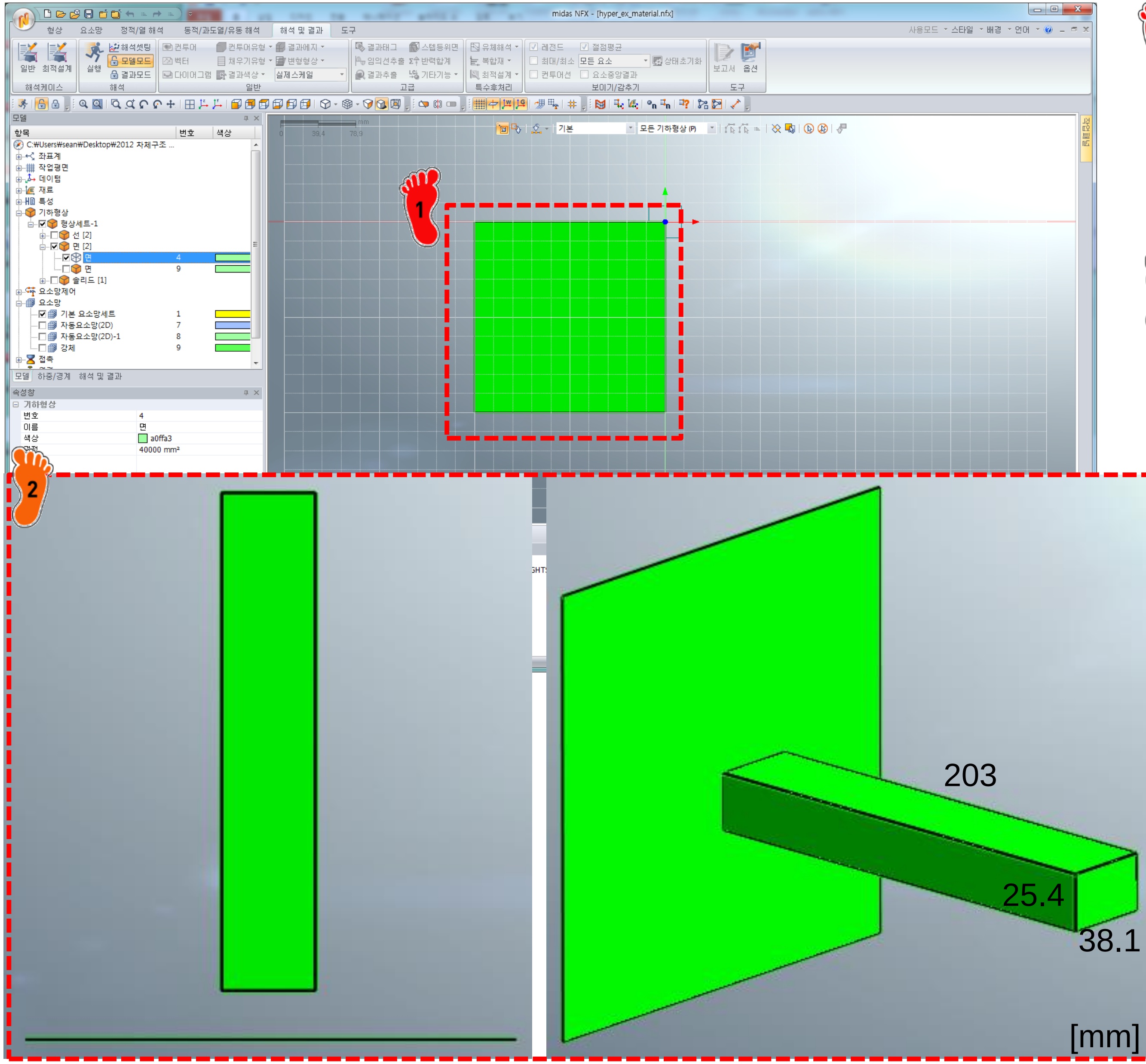
1 새로 만들기 클릭

2 3차원/일반모델 선택

3 확인

Copyright © Computational Design Lab. All rights reserved.

기하형상 생성 (2)

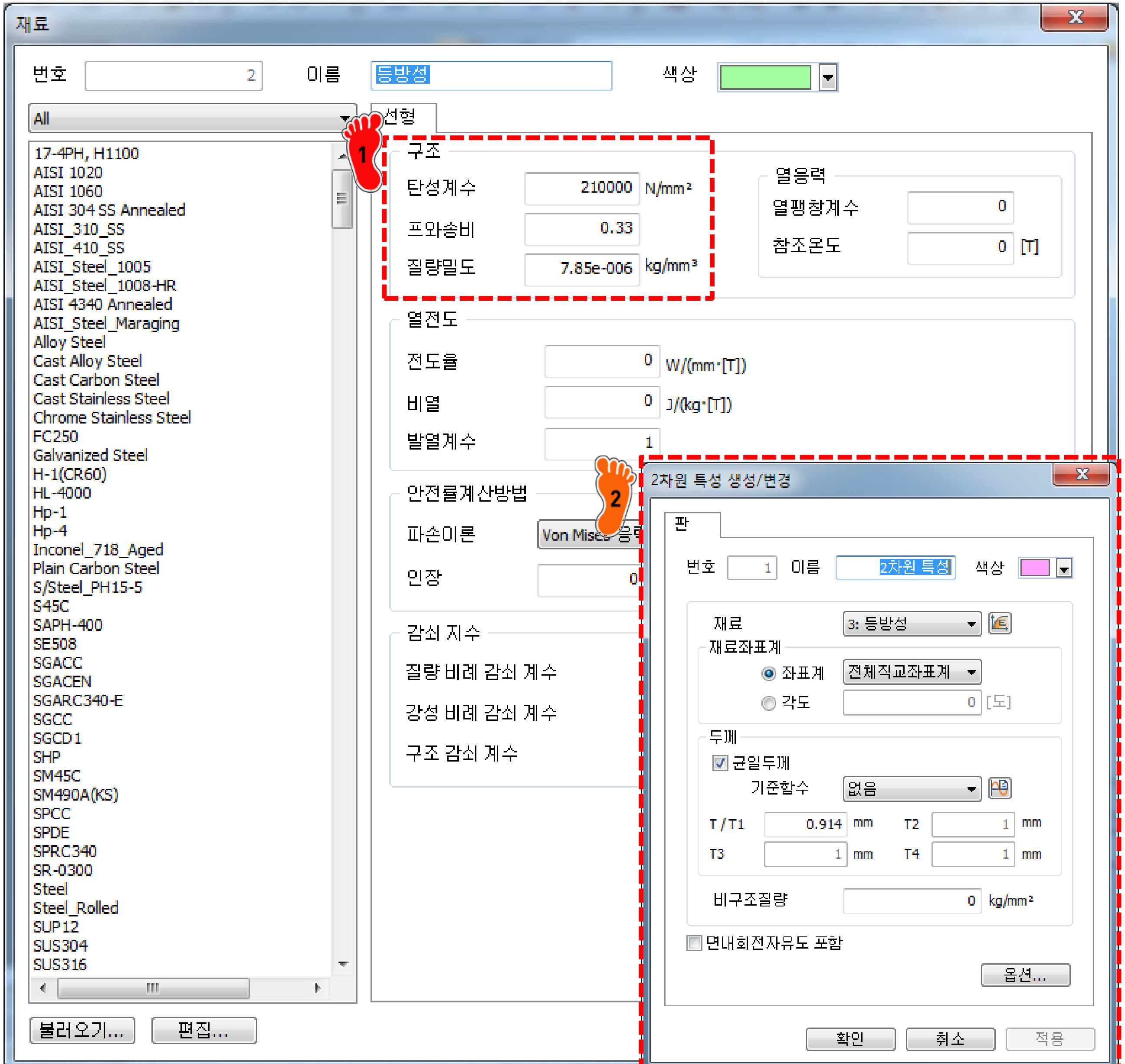


1 충돌 대상이 될 임의의 평판 생성 (100x100 벽 형상)

2 평판으로부터 약 5 mm 정도 떨어진 곳에 예제에서 주어진 기하형상을 갖는 솔리드 생성 (빔 형상)

Copyright © Computational Design Lab. All rights reserved.

재료 물성 및 특성 입력



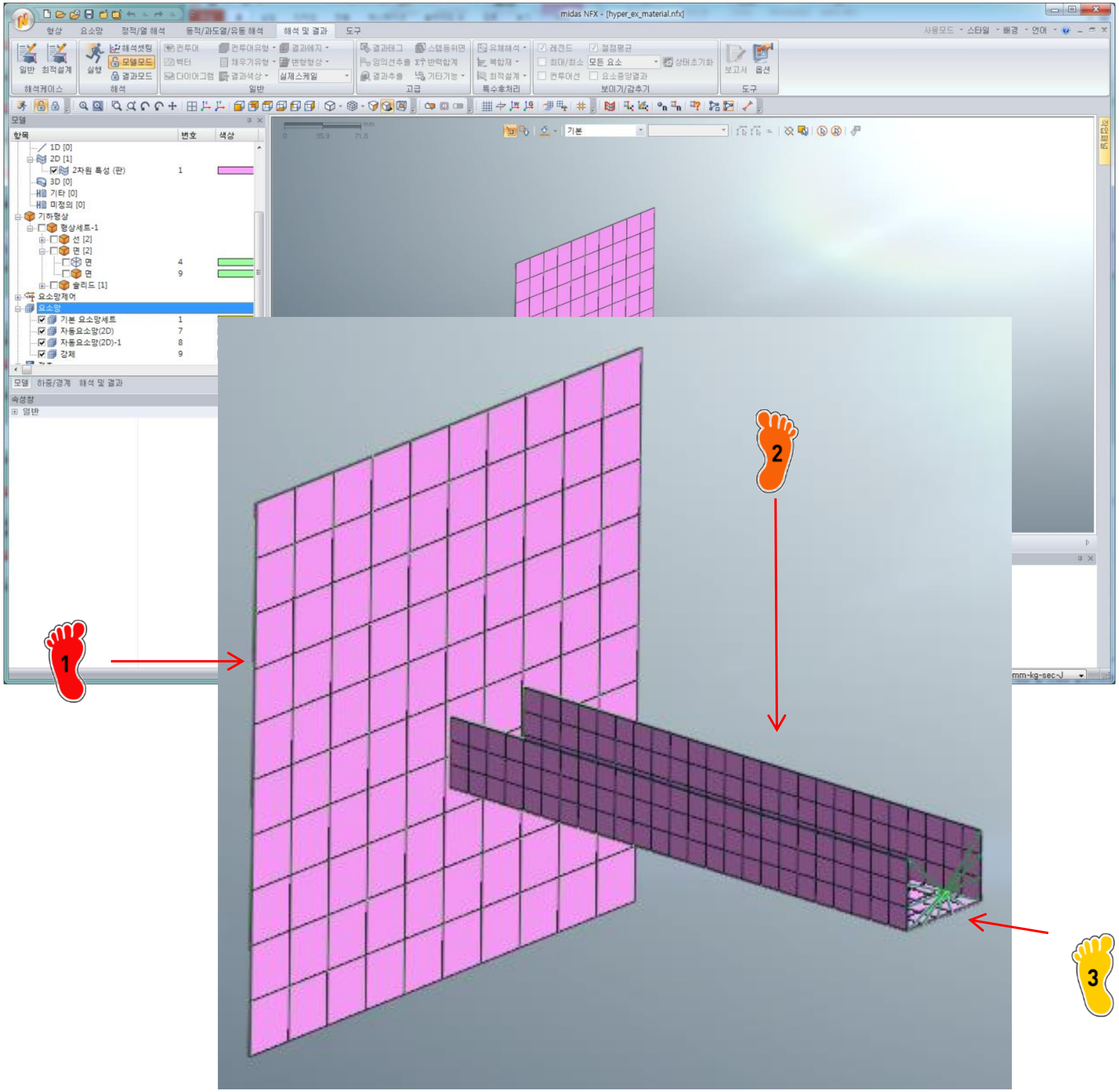
1 탄성계수 210 GPa
푸와송비 0.33
질량밀도 7.85e-6 kg/mm^3

재료 생성

2 두께 0.914 mm 인 2차원
특성 생성

Copyright © Computational Design Lab. All rights reserved.

요소망 생성

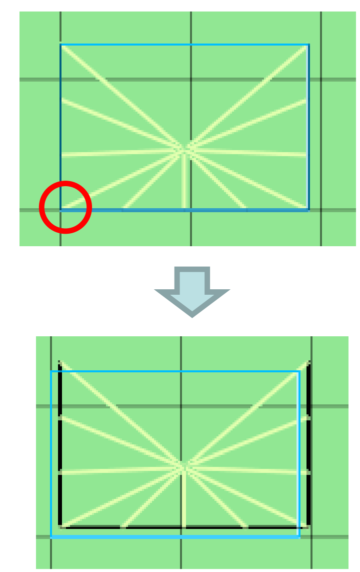


1 벽 형상은 요소크기 20으로 요소망 생성

2 빔 형상은 요소크기 10으로 요소망 생성

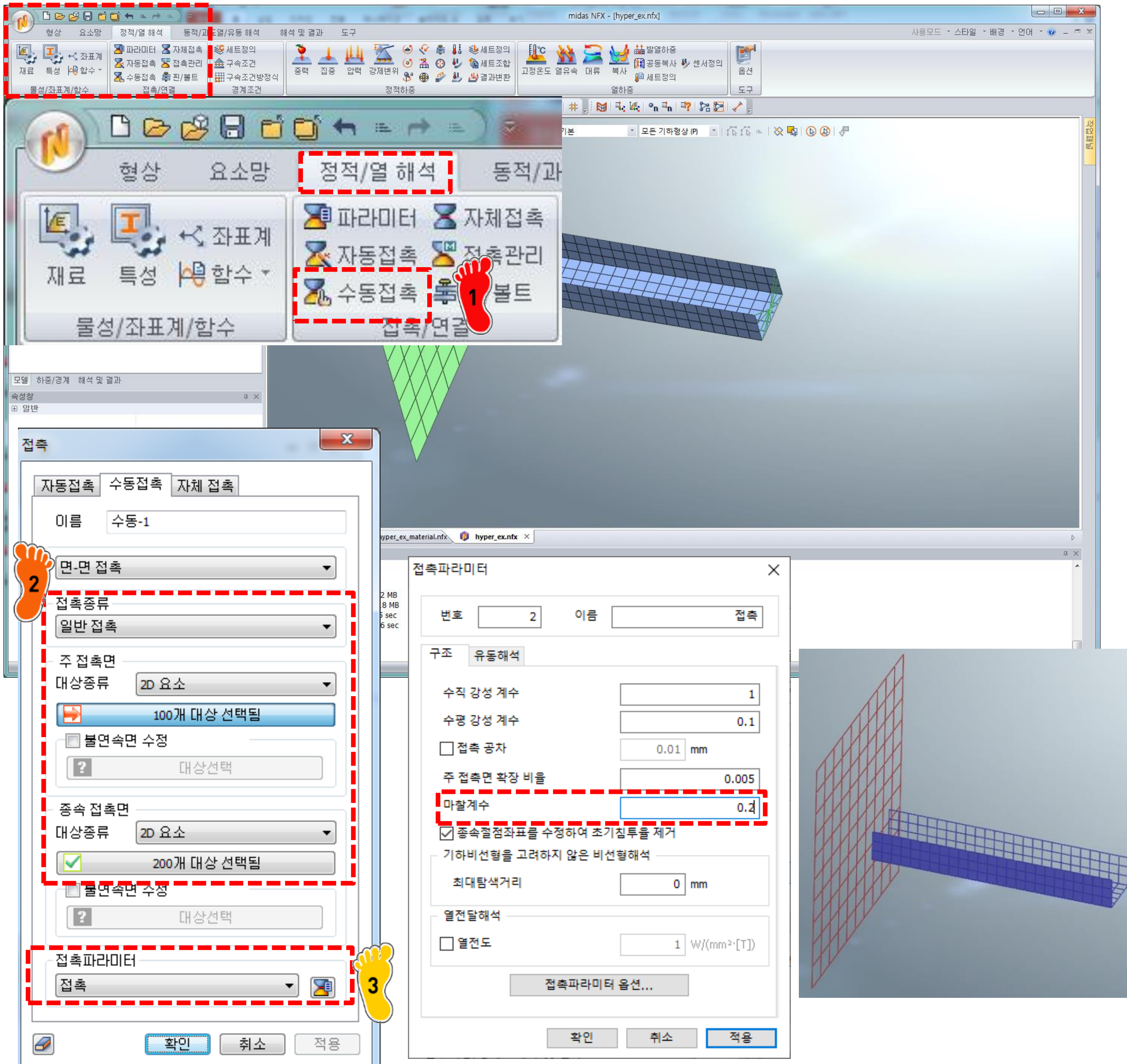
3 빔 형상 끝부분에 강체 요소 생성

평판과 빔요소 접촉면의 노드가 일치하지 않도록 이동 (일치하는 경우 수렴성 저하)



Copyright © Computational Design Lab. All rights reserved.

접촉조건 설정 (1)

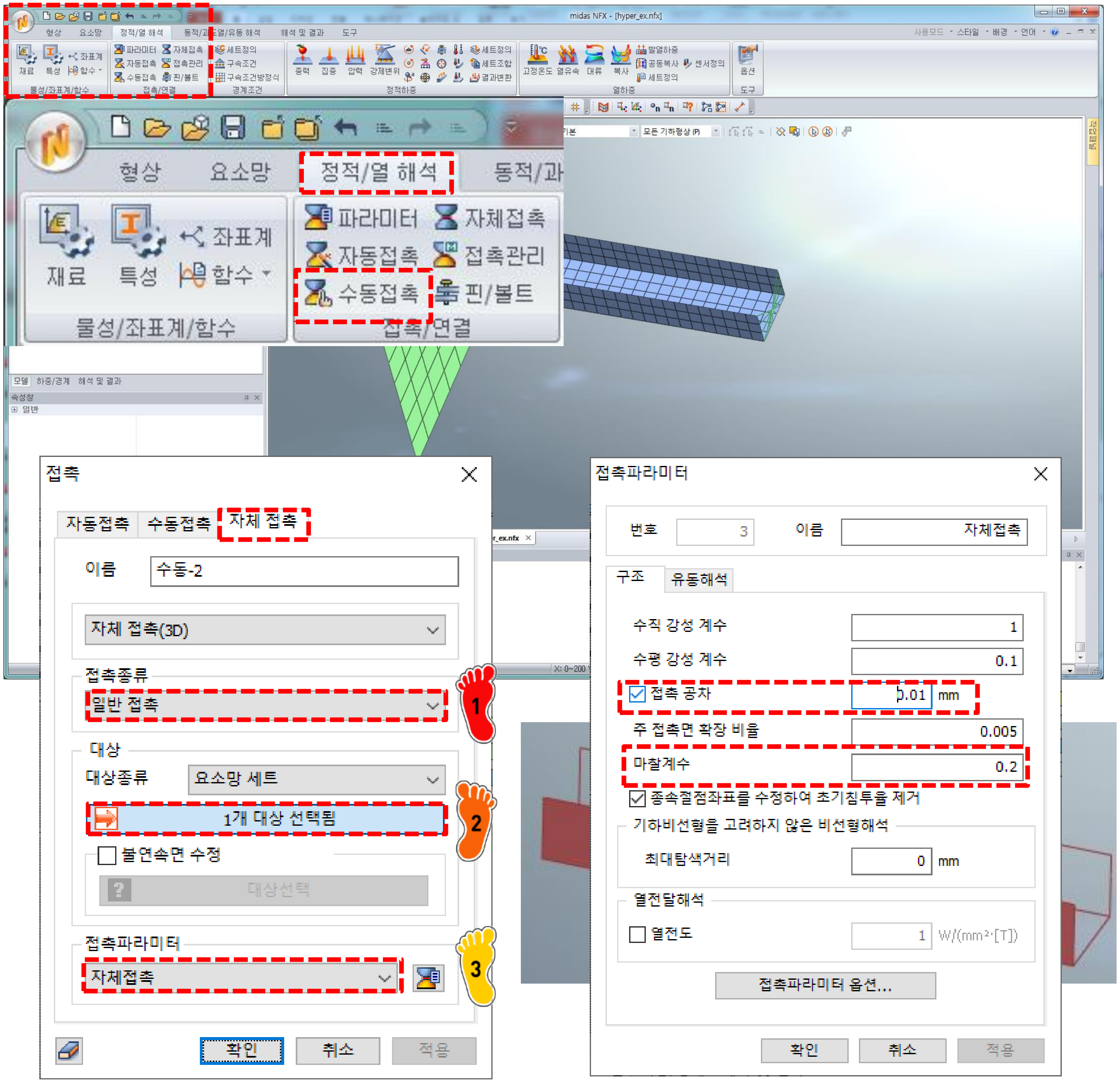


1. 정적/열 해석 탭 메뉴에서 접촉/연결 메뉴의 수동접촉 클릭
2. 접촉종류: 일반 접촉
   주 접촉면: 벽 형상 선택
   종속 접촉면: 빔 형상 선택
3. 접촉 파라미터는 마찰계수 0.2 로 파라미터 생성/변경

확인

Copyright © Computational Design Lab. All rights reserved.

접촉조건 설정 (2)

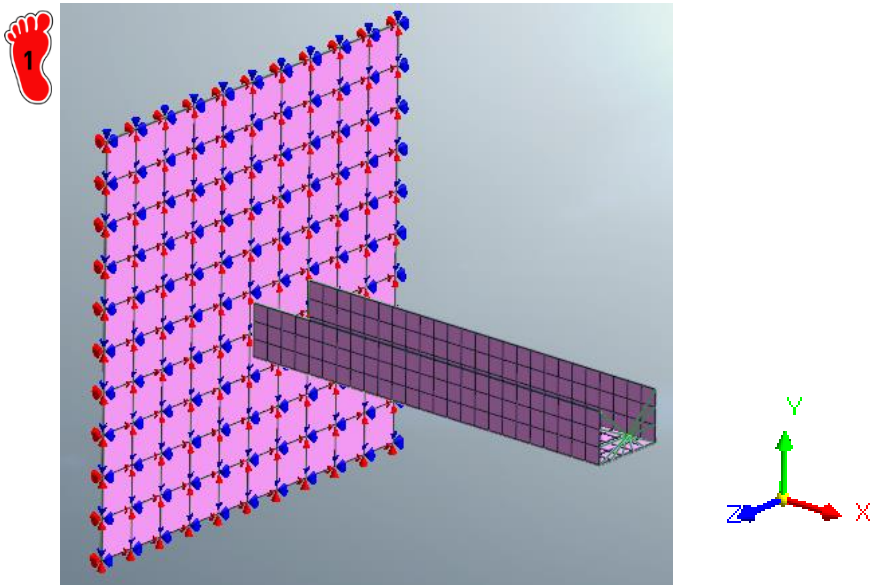


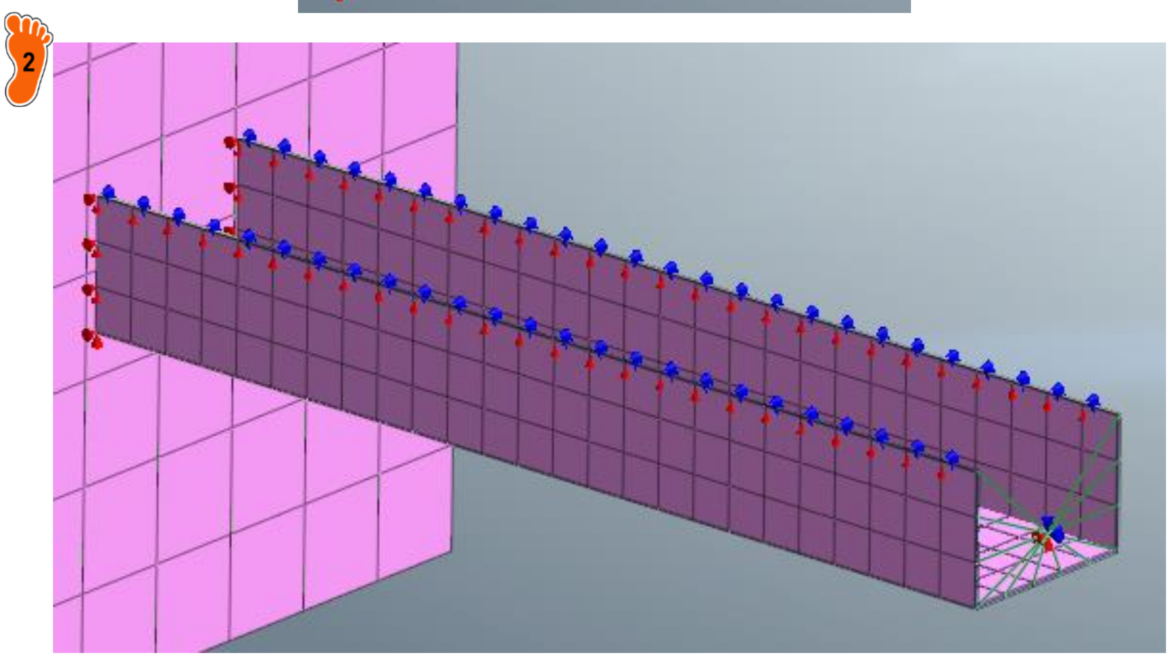
1. 접촉 메뉴의 자체접촉 탭 메뉴에서 일반접촉으로 접촉 종류 변경
2. 빔 형상 선택
3. 자체접촉을 위한 파라미터 설정 (접촉공차/마찰계수)

확인

Copyright © Computational Design Lab. All rights reserved.

구속조건 및 하중조건 설정 (1)





1 벽 부분은 고정구속으로 구속조건 설정

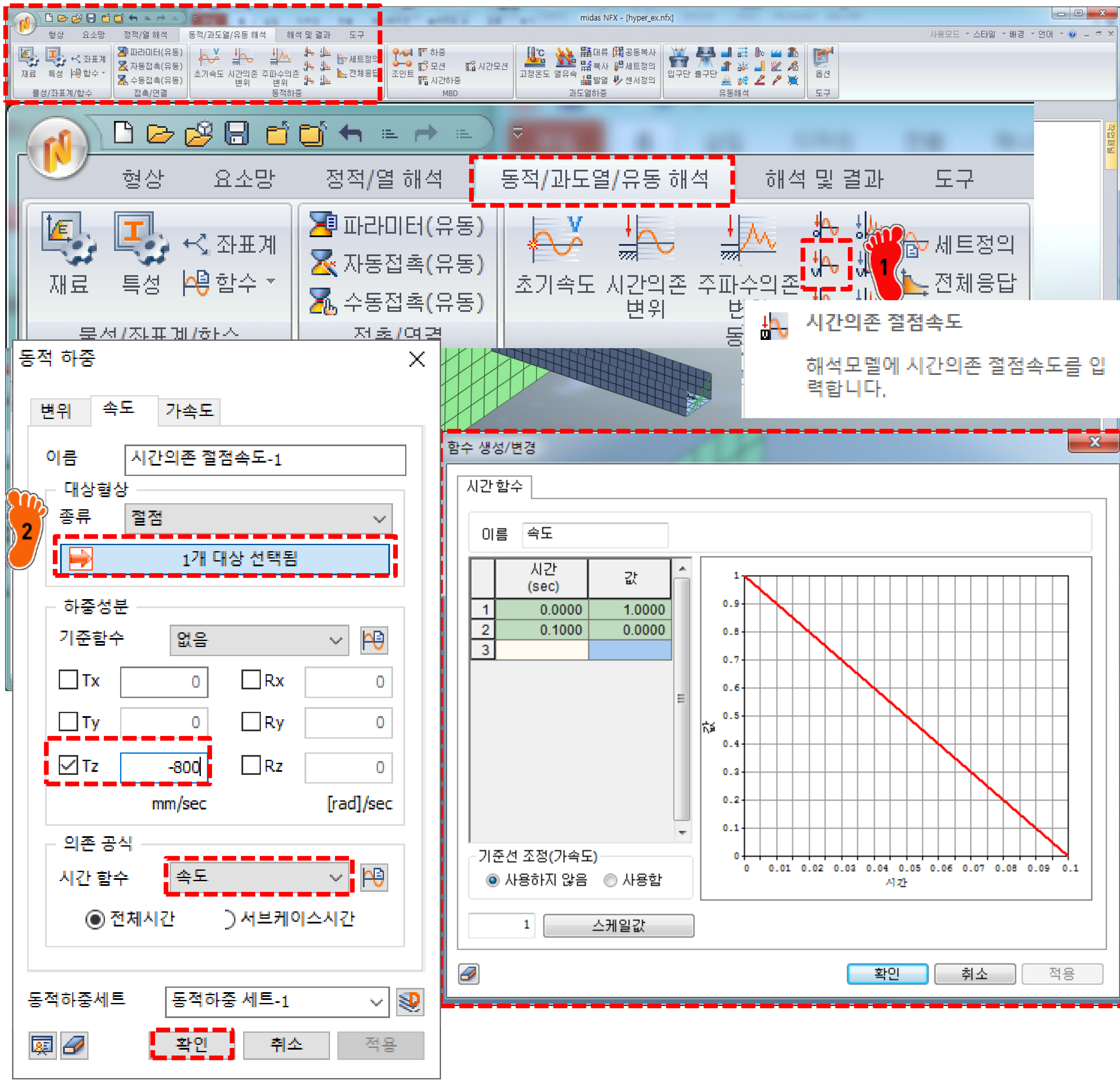
2 빔의 잘린 부분은 대칭 조건으로 경계조건 설정 (강체구속부분 제외)

강체의 중앙 부분의 절점은 이동히는 방향의 자유도를 제외한 모든 자유도 구속

벽-빔 접촉 부분은 이동방향(x) 제외 구속 (Ty,Tz)

Copyright © Computational Design Lab. All rights reserved.

구속조건 및 하중조건 설정 (2)



1 동적/과도열/유동 해석 탭 메뉴에서 동적하중 메뉴의 '시간의존 절점속도' 클릭

2 강체 중간의 절점 클릭

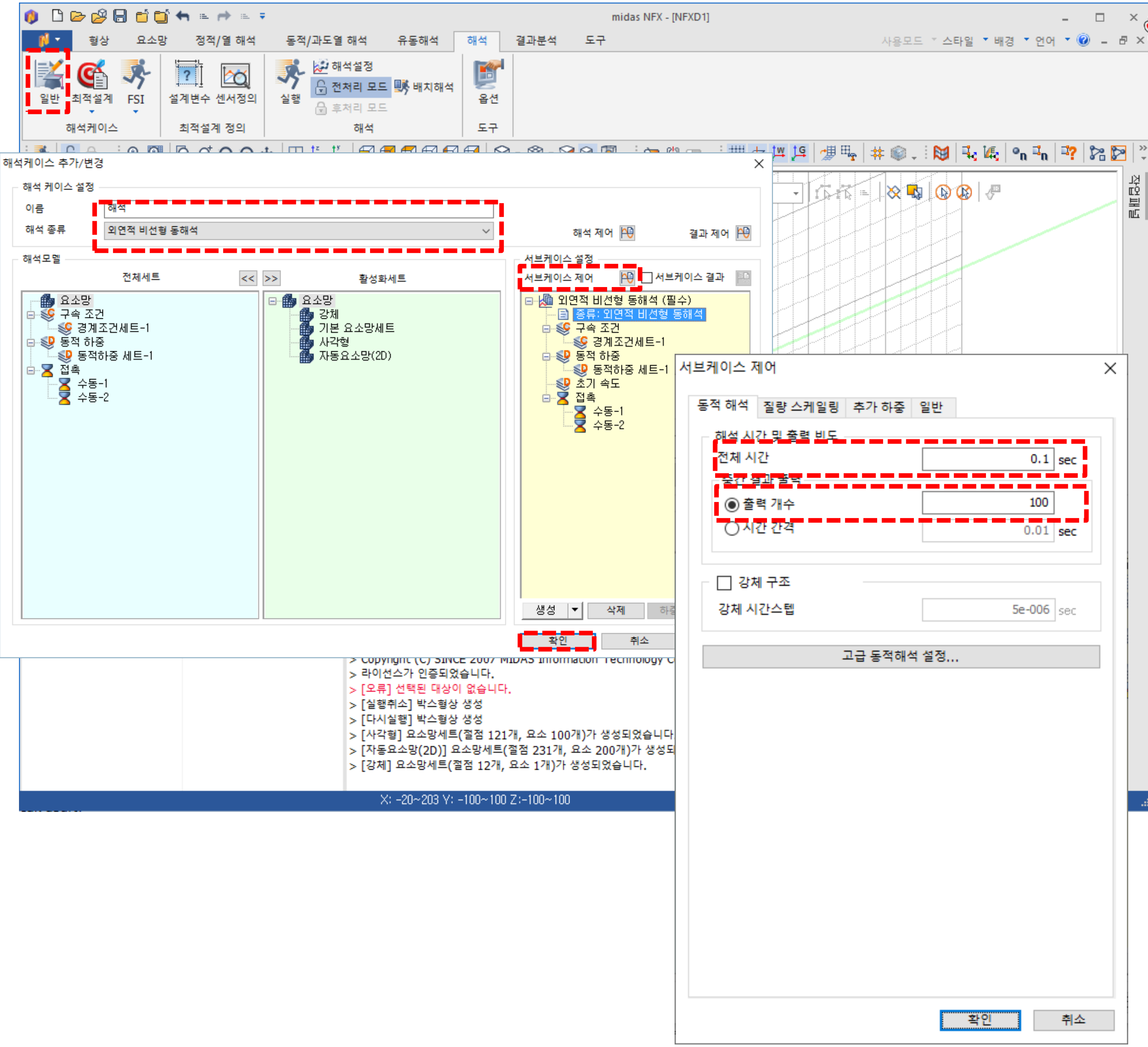
Tz(충돌방향): -800 입력

시간 함수 생성
0초일 때 1
0.1초일 때 0
의 값으로 설정

확인

Copyright © Computational Design Lab. All rights reserved.

해석 케이스 정의 및 해석 실행



1

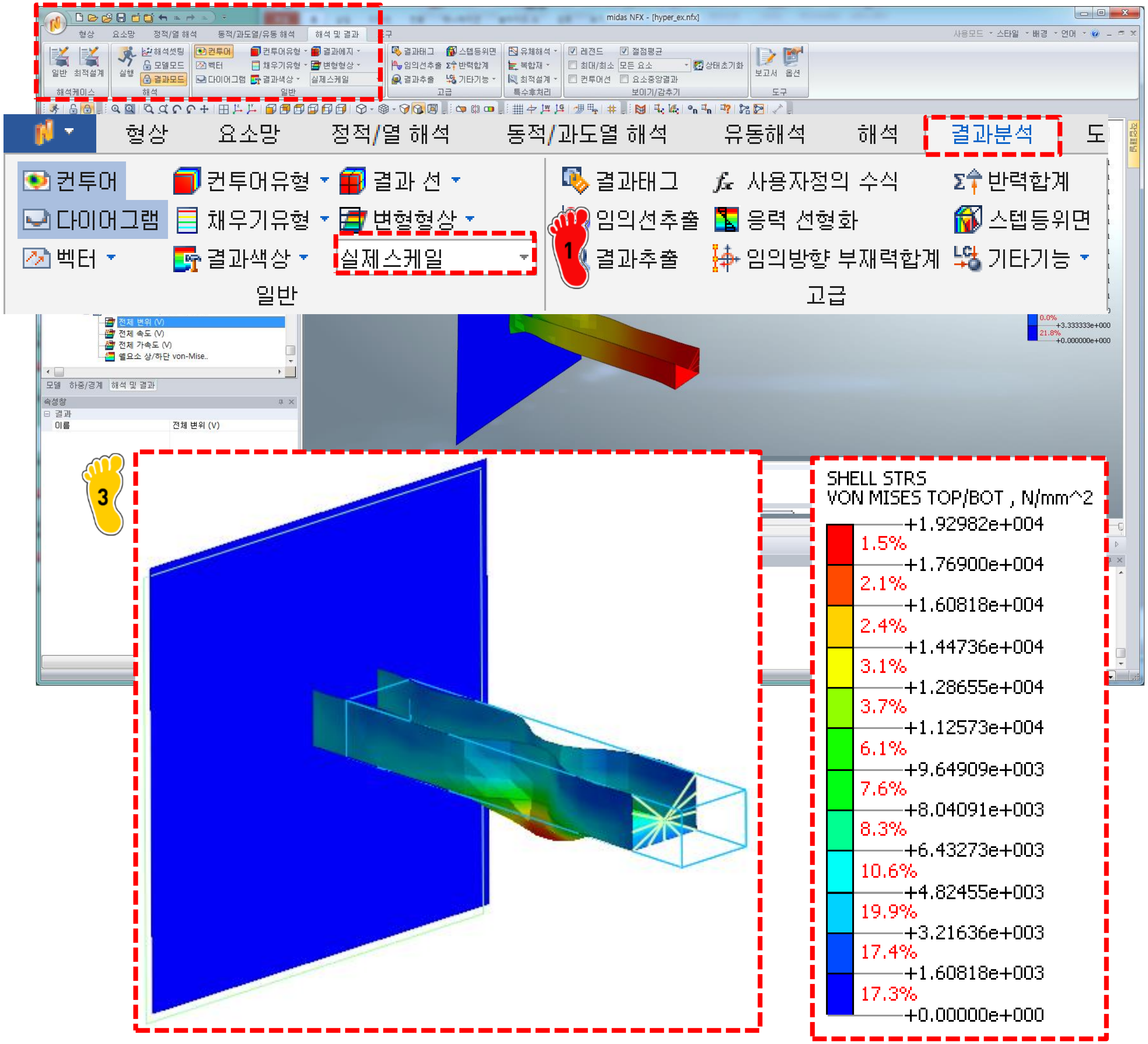
해석 케이스 외연적 비선형 동해석 선택

출력 개수 100으로 변경

해석 수행

Copyright © Computational Design Lab. All rights reserved.

후처리



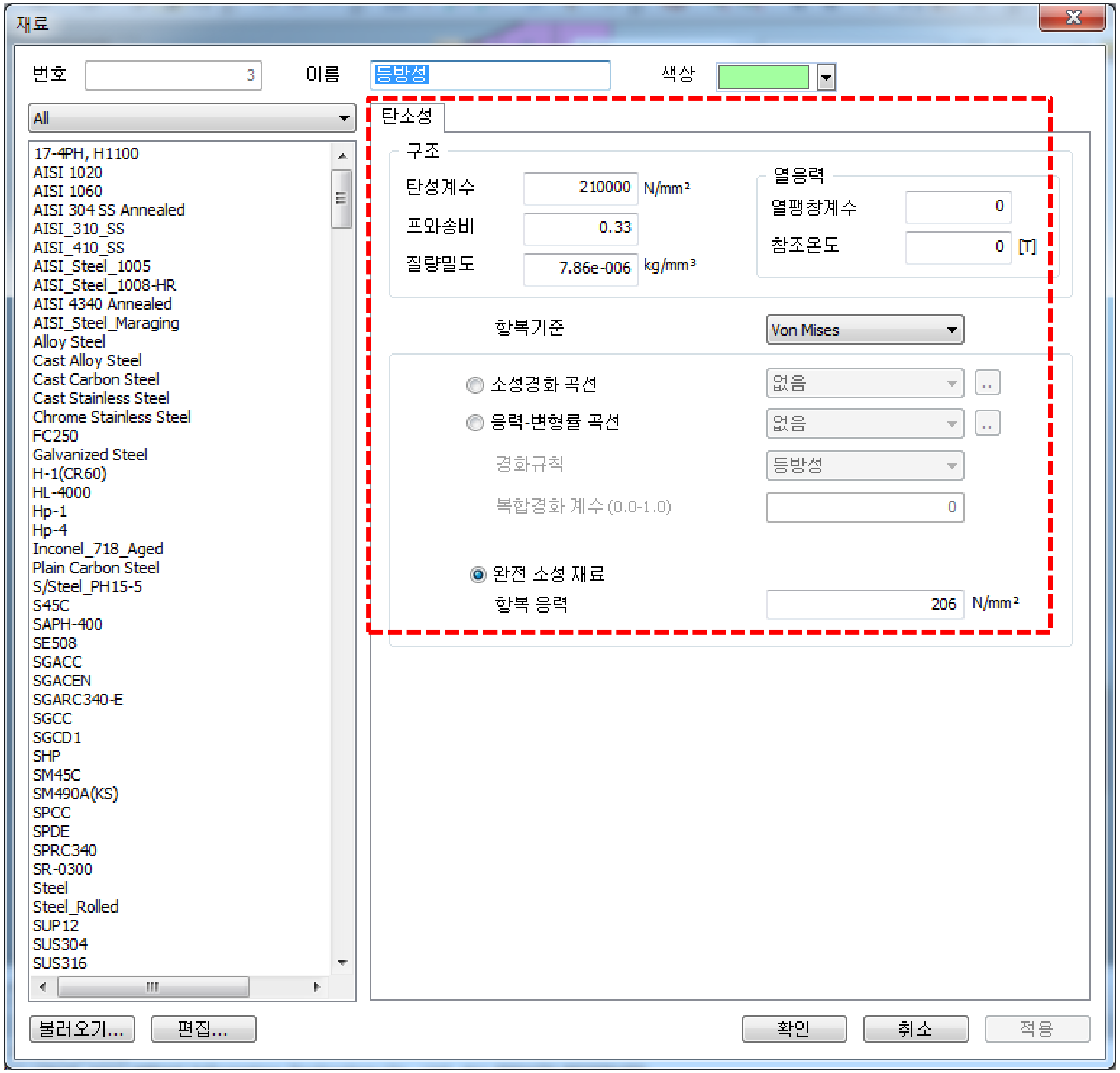
1. 결과분석 탭 메뉴의 변형 스케일을 실제스케일로 변경

2. 멀티-스텝 애니메이션 녹화 클릭 후 재생을 통하여 동영상으로 확인

3. 응력을 확인해보면 비정상적으로 높은 응력이 발생하는 것을 확인

Copyright © Computational Design Lab. All rights reserved.

재료 물성치 변경

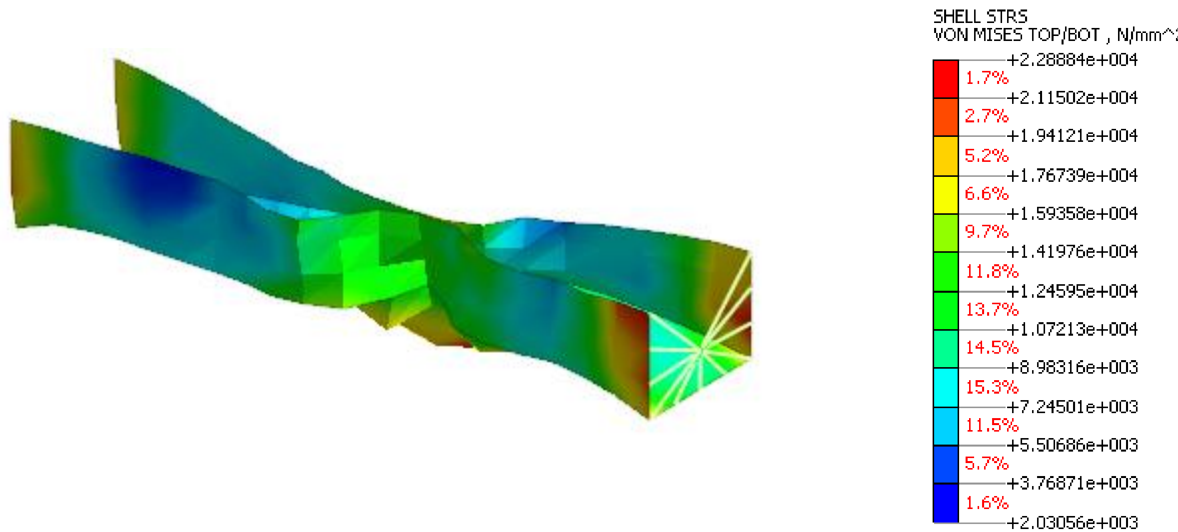


1 재료의 비선형성을 고려하기 위하여 탄소성 재료로 변경 후 해석 수행

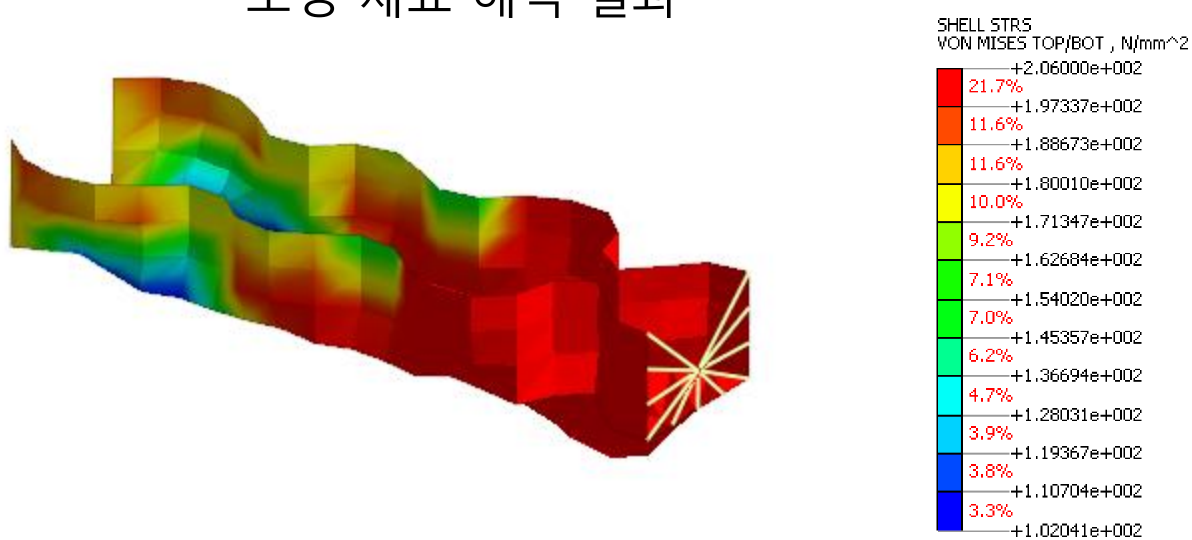
Copyright © Computational Design Lab. All rights reserved.

후처리

탄성 재료 해석 결과



소성 재료 해석 결과



1 소성 재료를 가정한 경우 최대 응력이 206 MPa 의 값을 갖는 것을 확인

Copyright © Computational Design Lab. All rights reserved.

연습문제: IMPACT OF A ROD ON RIGID WALL

Figure 12.6.1 shows a cylindrical rod model to simulate a high velocity impact event in which the cylindrical rod collides with a rigid wall. The collision is modeled by imposing zero axial displacement prescribed at one end of the rod, while imposing an initial axial velocity of 8937 in/sec to all other nodes. A von Mises elastic-perfectly plastic material model with isotropic hardening is used. The length and radius at 80 micro-seconds after the impact are obtained and compared with the reference values. Nonlinear explicit transient analysis is performed and the initial mesh and deformed shapes at 40 and 80 micro-seconds after the impact are shown in Figure 12.6.2.

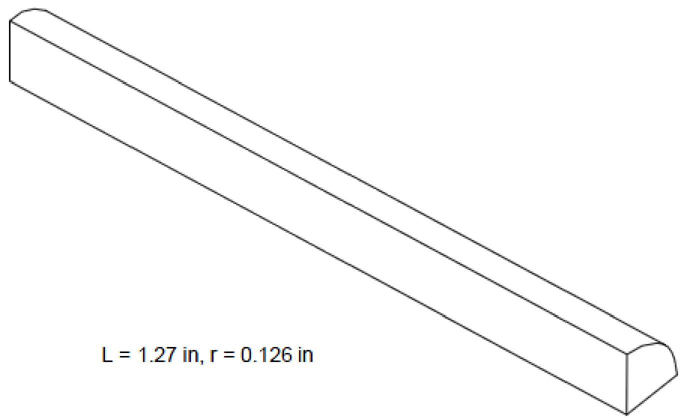


Figure 12.6.1 A rod impact model

Material data	Young's modulus	$E = 17$ msi
	Poisson's ratio	$\nu = 0.35$
	Density	$\rho = 0.3224$ lbm/in^3
	Hardening Modulus	$E_T = 14.5$ ksi
	Yield Stress	$\sigma_Y = 58$ ksi

Table 12.6.1 The deformed length and radius at t=80 μsec after impact

	Length [in]	Radius [in]
Reference	0.84	0.28
midas-NFX	0.84	0.26

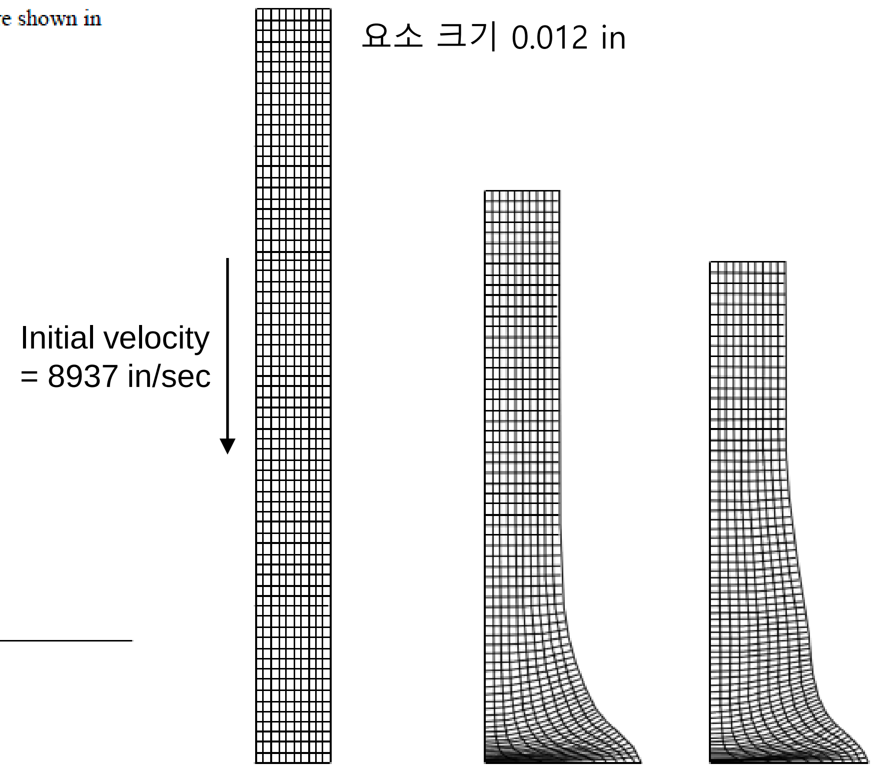
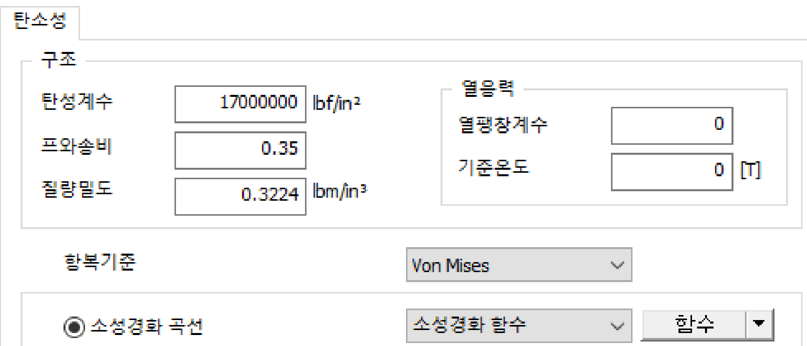
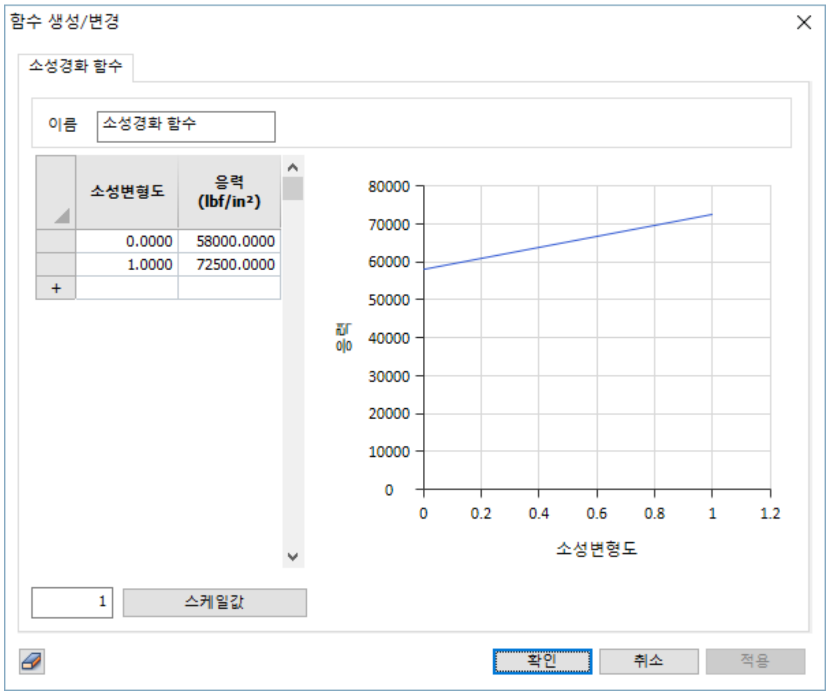


Figure 12.6.2 Deformed shape of the rod at t=0, 40 and 80 μsec

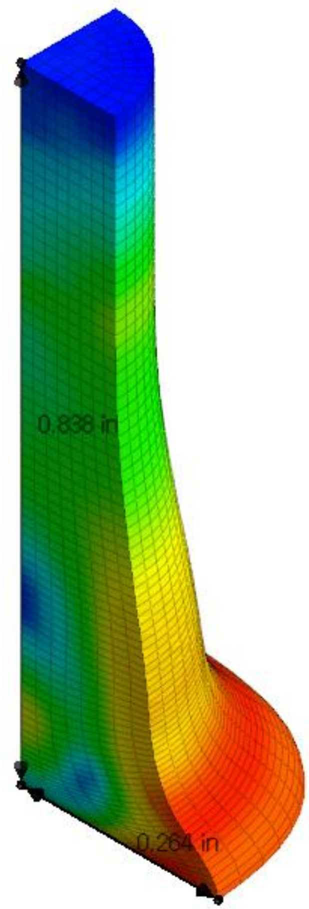
Copyright © Computational Design Lab. All rights reserved.

연습문제: IMPACT OF A ROD ON RIGID WALL

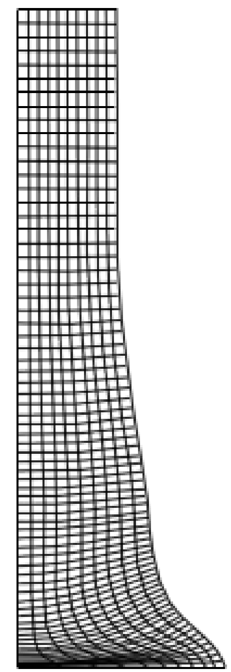




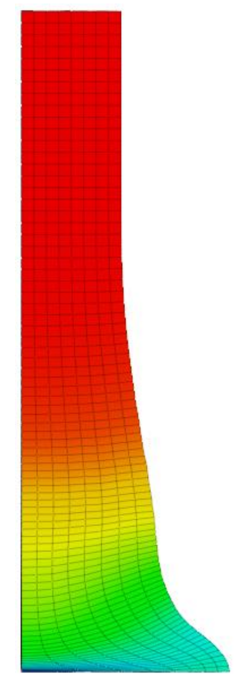
해석 결과
(응력)



Reference



NFX



Copyright © Computational Design Lab. All rights reserved.

BEAM CRUSH ANALYSIS
쉘 요소

Copyright © Computational Design Lab. All rights reserved.

예제: BEAM CRUSH ANALYSIS (1)

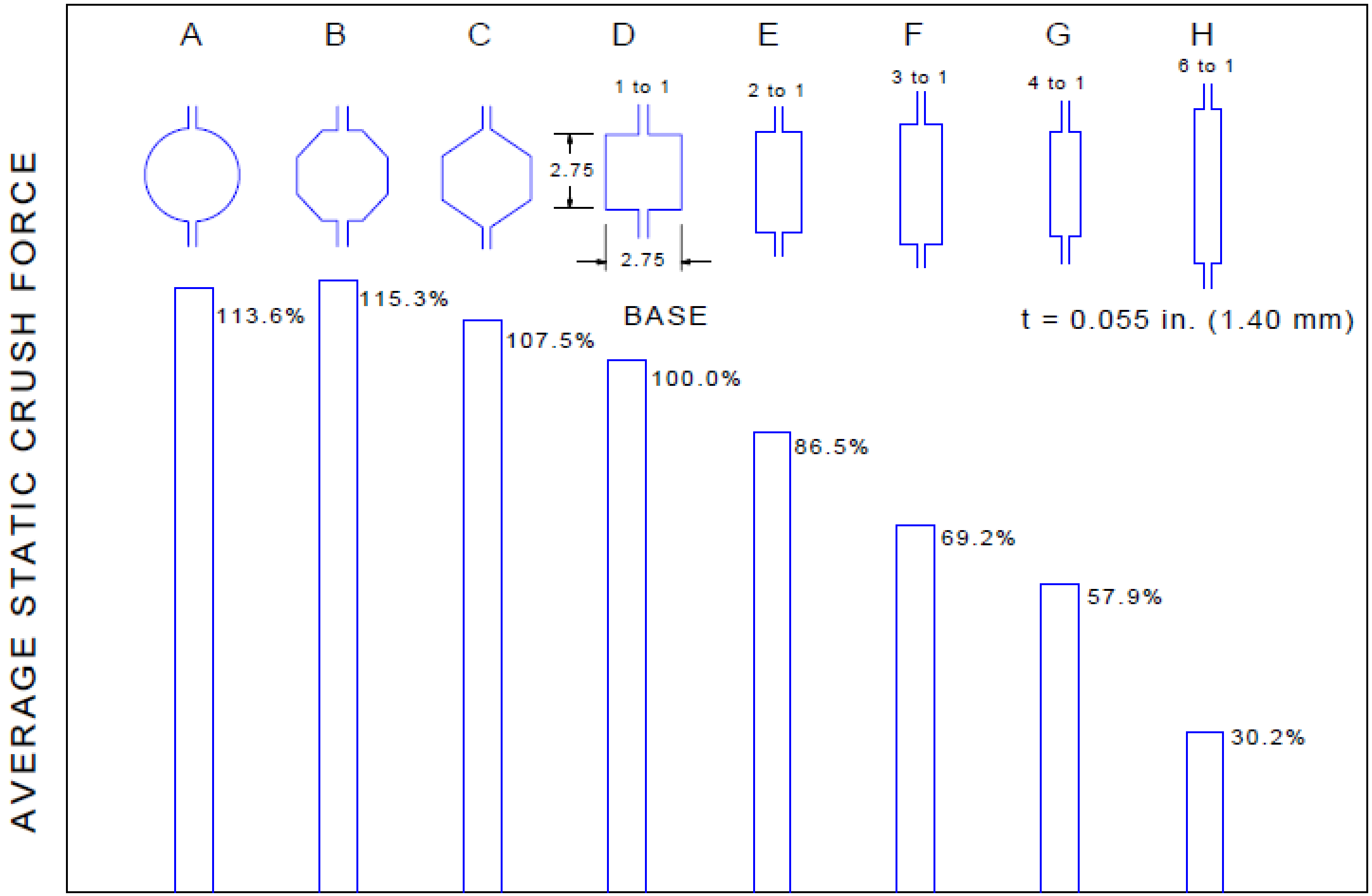


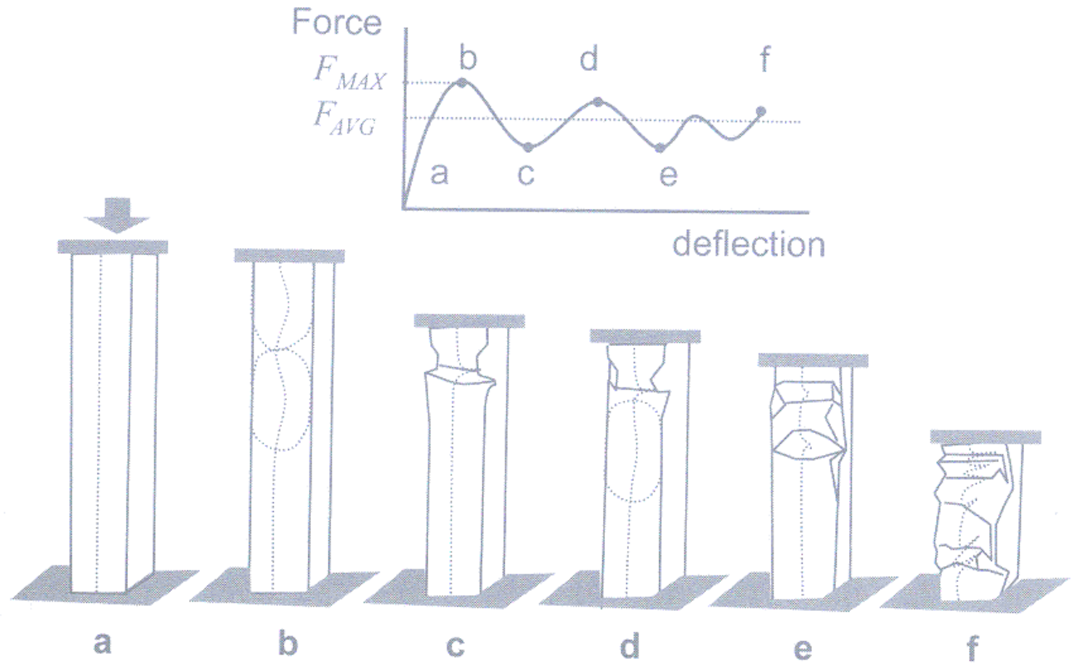
Figure 3.6.4-1 Average static crush force vs. section shape
(All samples were the same mass and length)

Copyright © Computational Design Lab. All rights reserved.

예제: BEAM CRUSH ANALYSIS (2)

Geometry information

Length: 305 mm
70 mm square
thickness 1.4 mm
Average strength 247 MPa



$$P_M = 386 t^{1.86} b^{0.14} \sigma_Y^{0.57}$$

$$P_{MAX} = 2.87 P_M$$

$$P_1 = 1.42 P_M$$

$$P_2 = 0.57 P_M$$

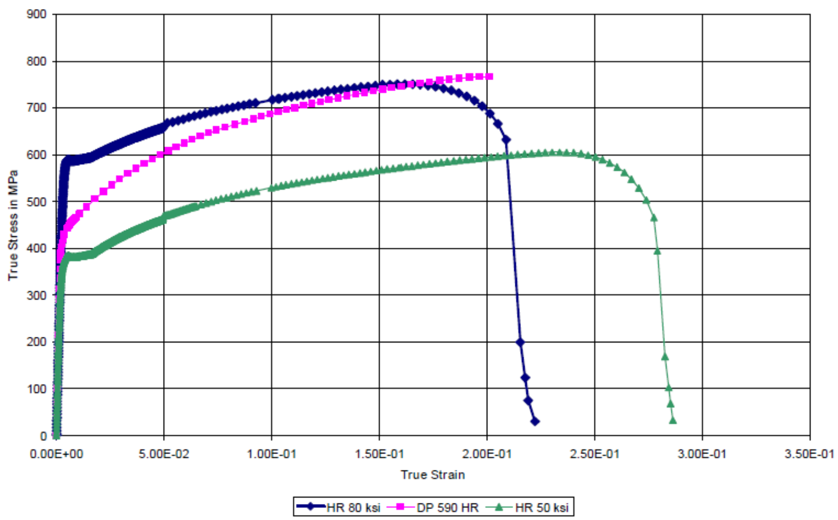
Copyright © Computational Design Lab. All rights reserved.

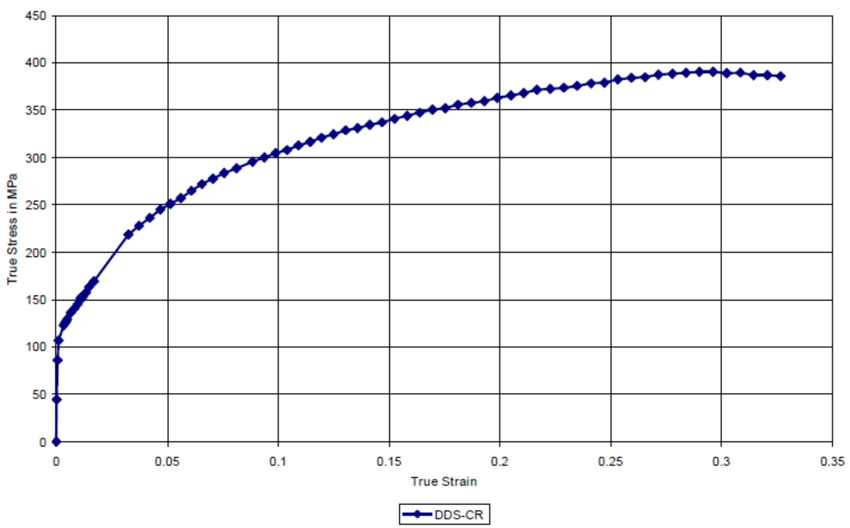
예제: 재료 특성

Some of the material properties required to predict the crush characteristics are:

1. Stress-strain properties representative of the material for large plastic deformation
2. Change in properties under dynamic loading conditions
3. Strain hardening
4. Ductility properties
5. The variability that can be expected for production steels

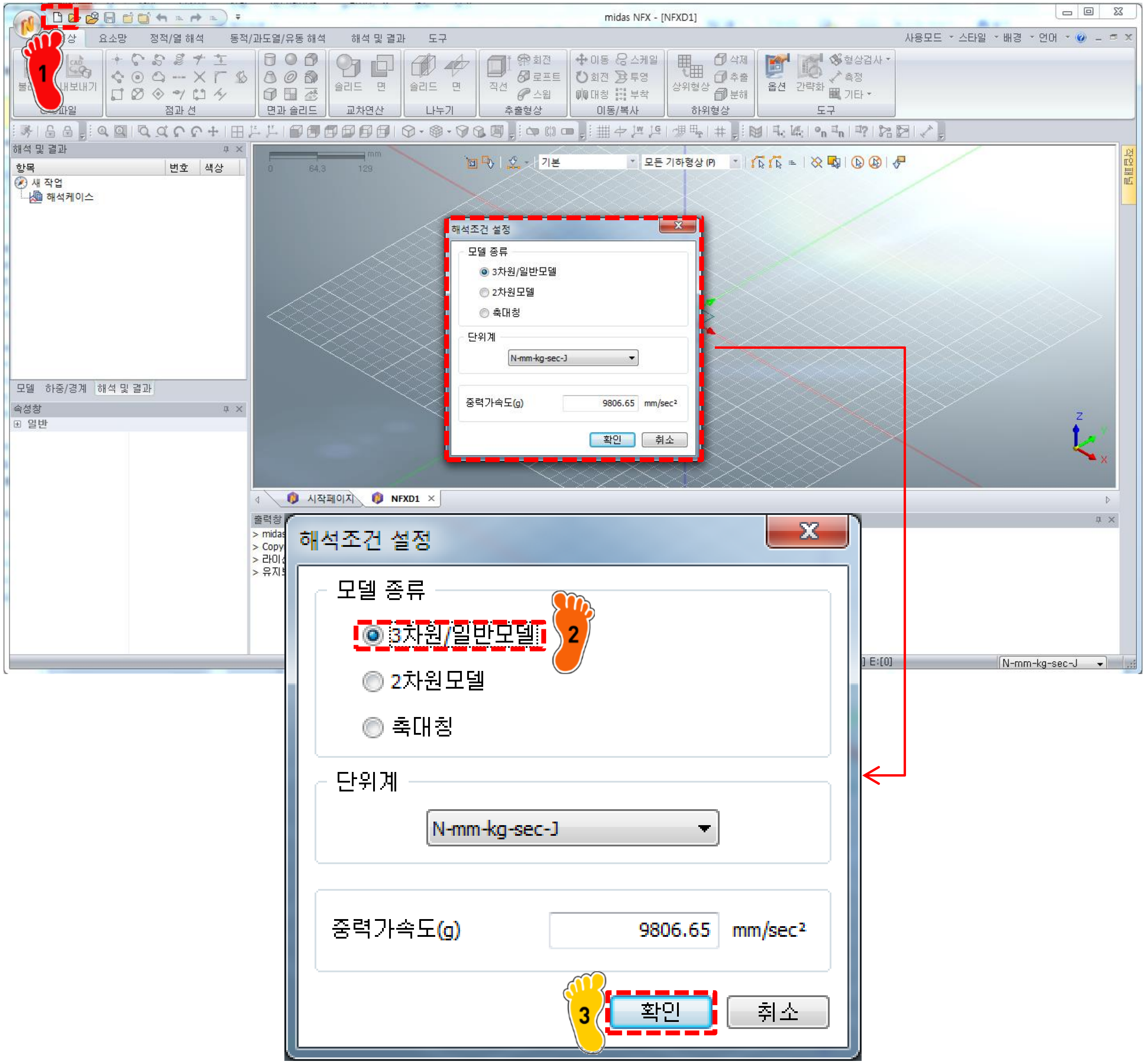
Stress-strain curves





Copyright © Computational Design Lab. All rights reserved.

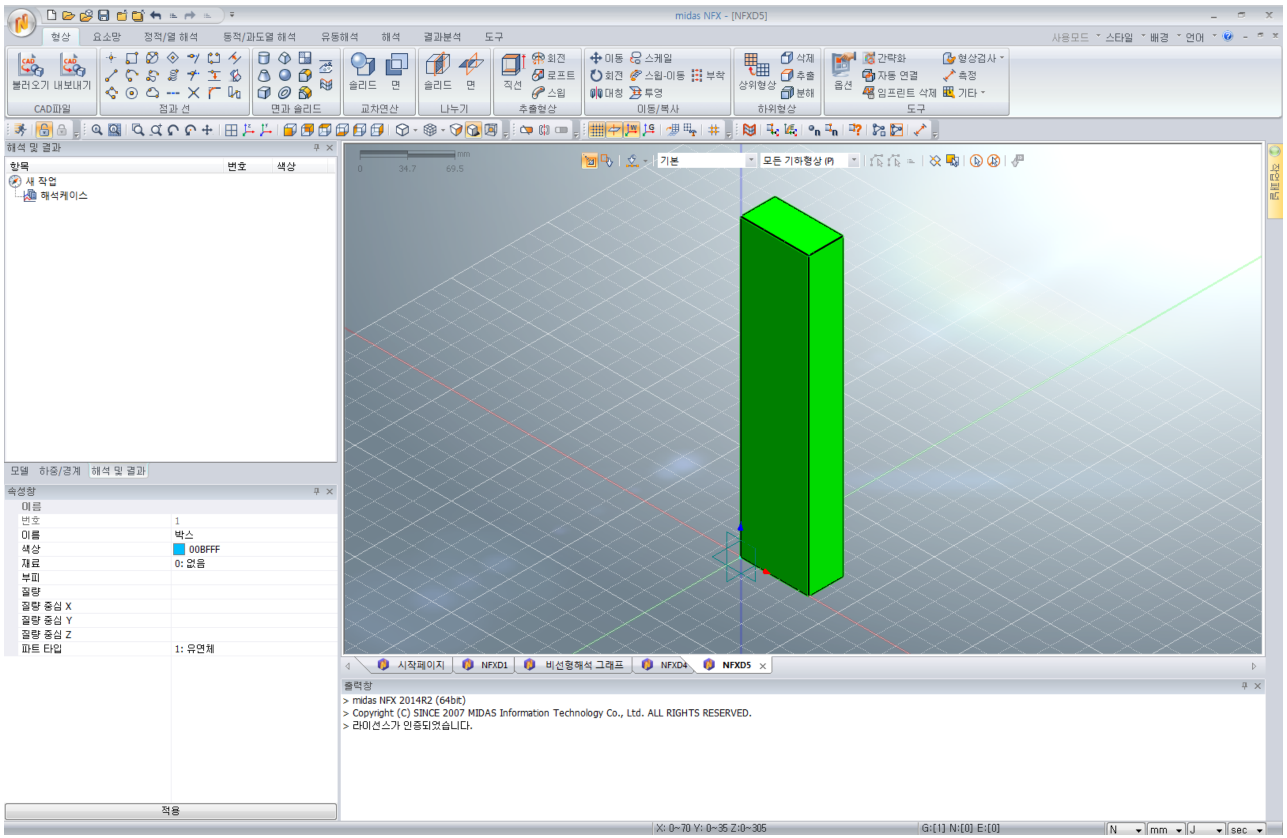
기하형상 생성 (1)



1. 새로 만들기 클릭
2. 3차원/일반모델 선택
3. 확인

Copyright © Computational Design Lab. All rights reserved.

기하형상 생성 (2)



1 기하형상 생성

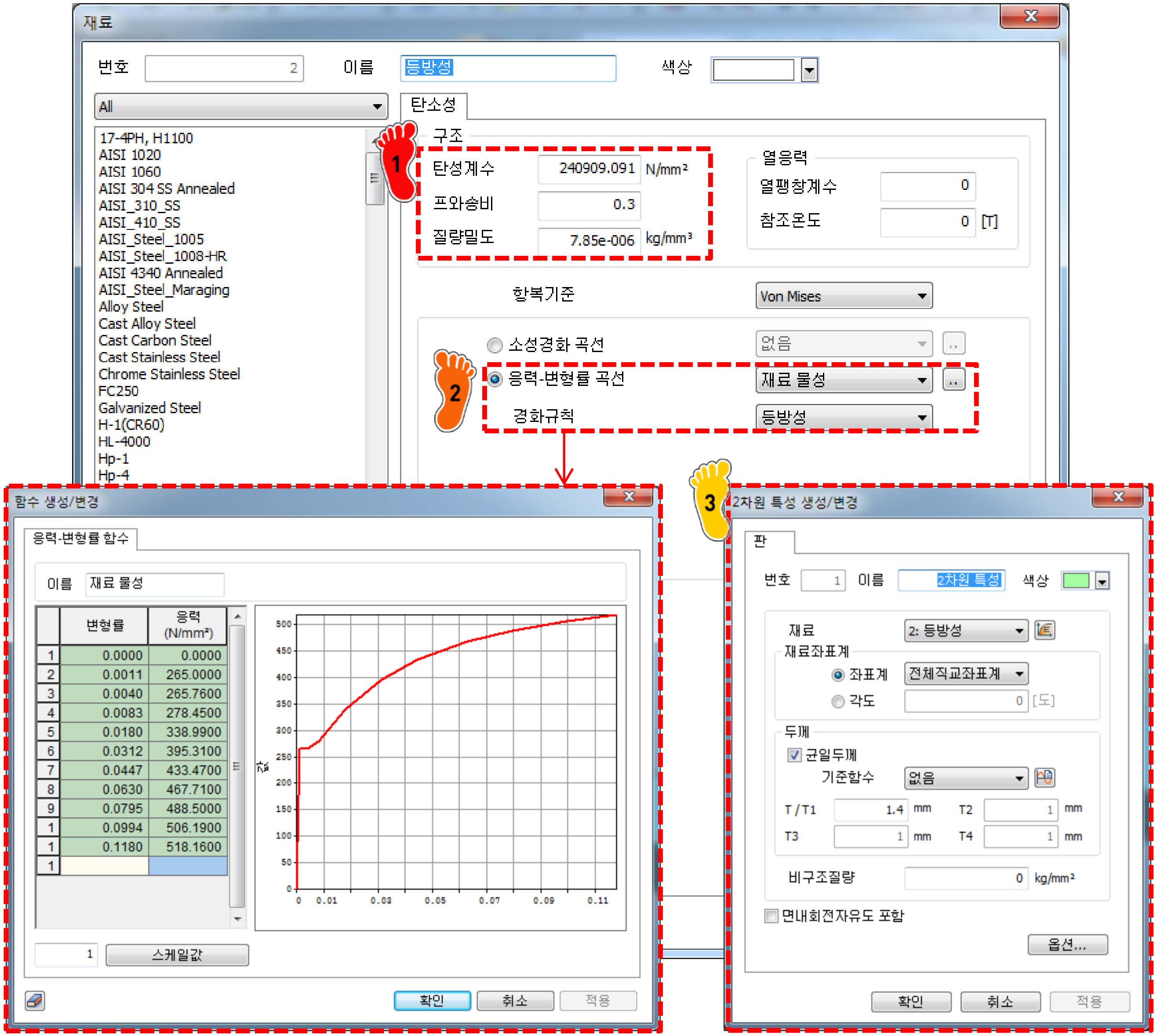
사각형 형상은

가로: 70 mm
세로: 35 mm
높이: 305 mm

로 생성

Copyright © Computational Design Lab. All rights reserved.

재료 물성 및 특성 입력



1 탄소성 탭메뉴
탄성계수 265000/1.1 MPa
푸와송비 0.3
질량밀도 7.85e-6 kg/mm^3
입력

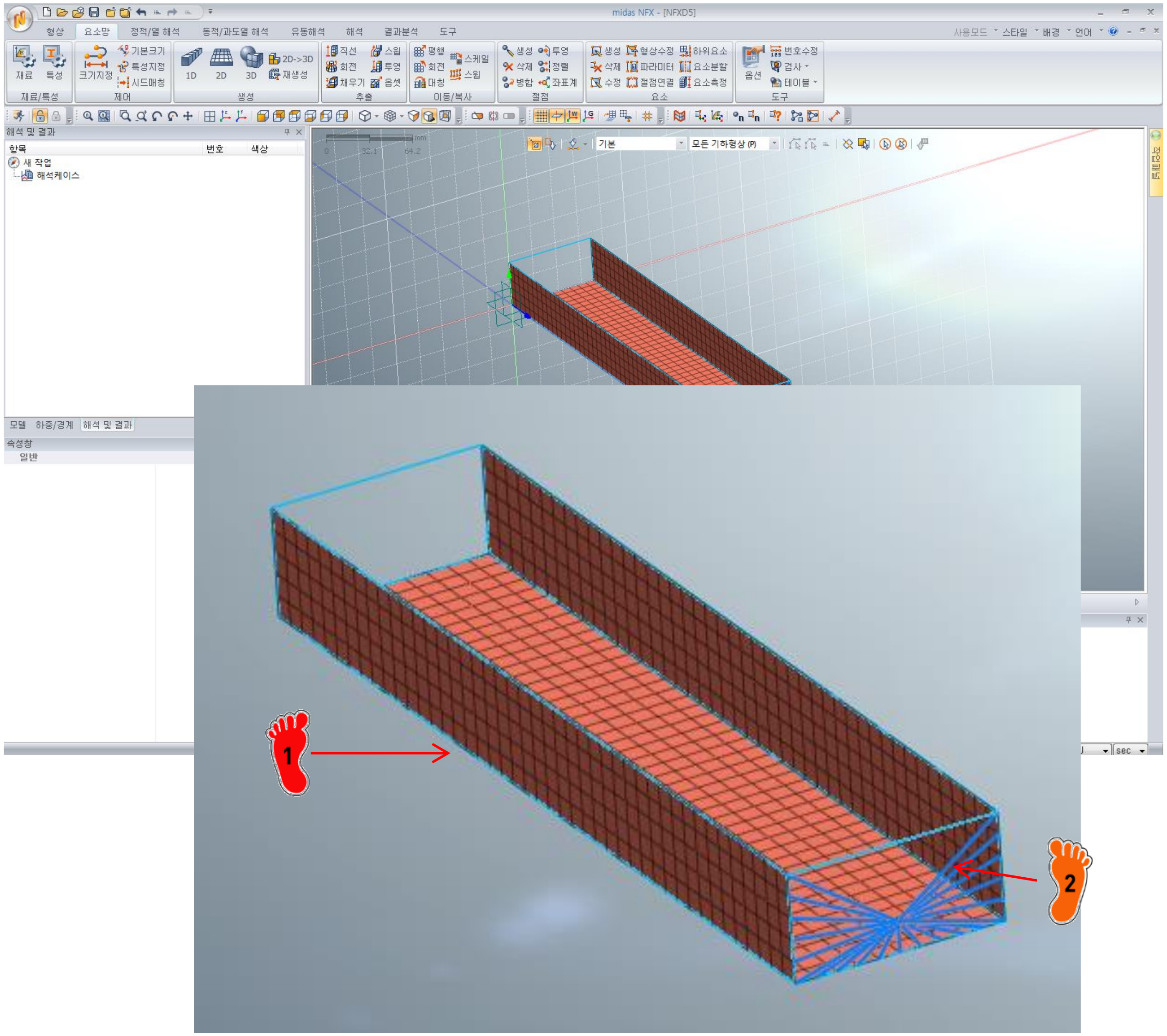
2 보기에 있는 응력-변형률 곡선 생성

3 2차원 특성 생성 (t=1.4)

	변형률	응력 (N/mm²)
1	0.0000	0.0000
2	0.0011	265.0000
3	0.0040	265.7600
4	0.0083	278.4500
5	0.0180	338.9900
6	0.0312	395.3100
7	0.0447	433.4700
8	0.0630	467.7100
9	0.0795	488.5000
1	0.0994	506.1900
1	0.1180	518.1600
1		

Copyright © Computational Design Lab. All rights reserved.

요소망 생성

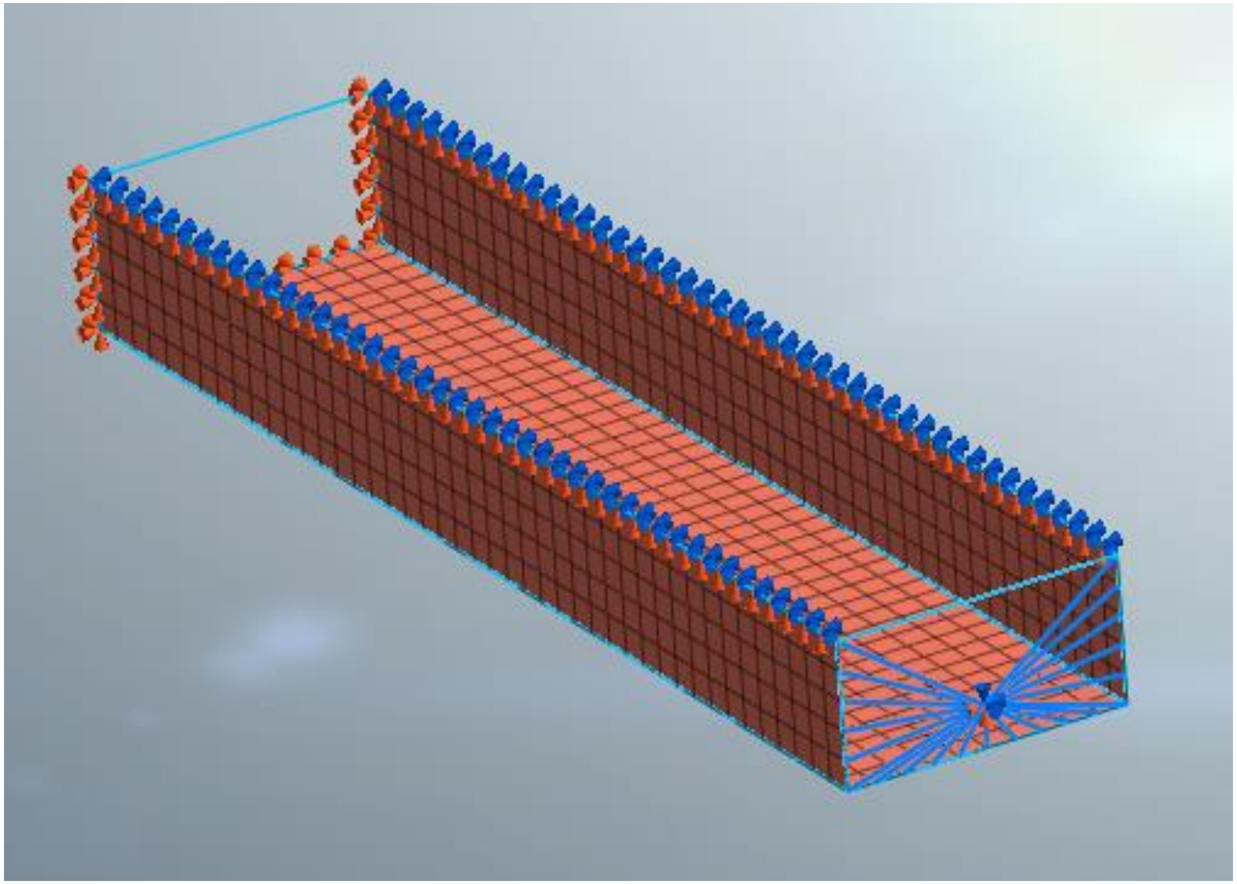


1 빔 형상은 요소크기 7로 요소망 생성

2 빔 형상 끝부분에 강체 요소 생성

Copyright © Computational Design Lab. All rights reserved.

구속조건 및 하중조건 설정 (1)



1

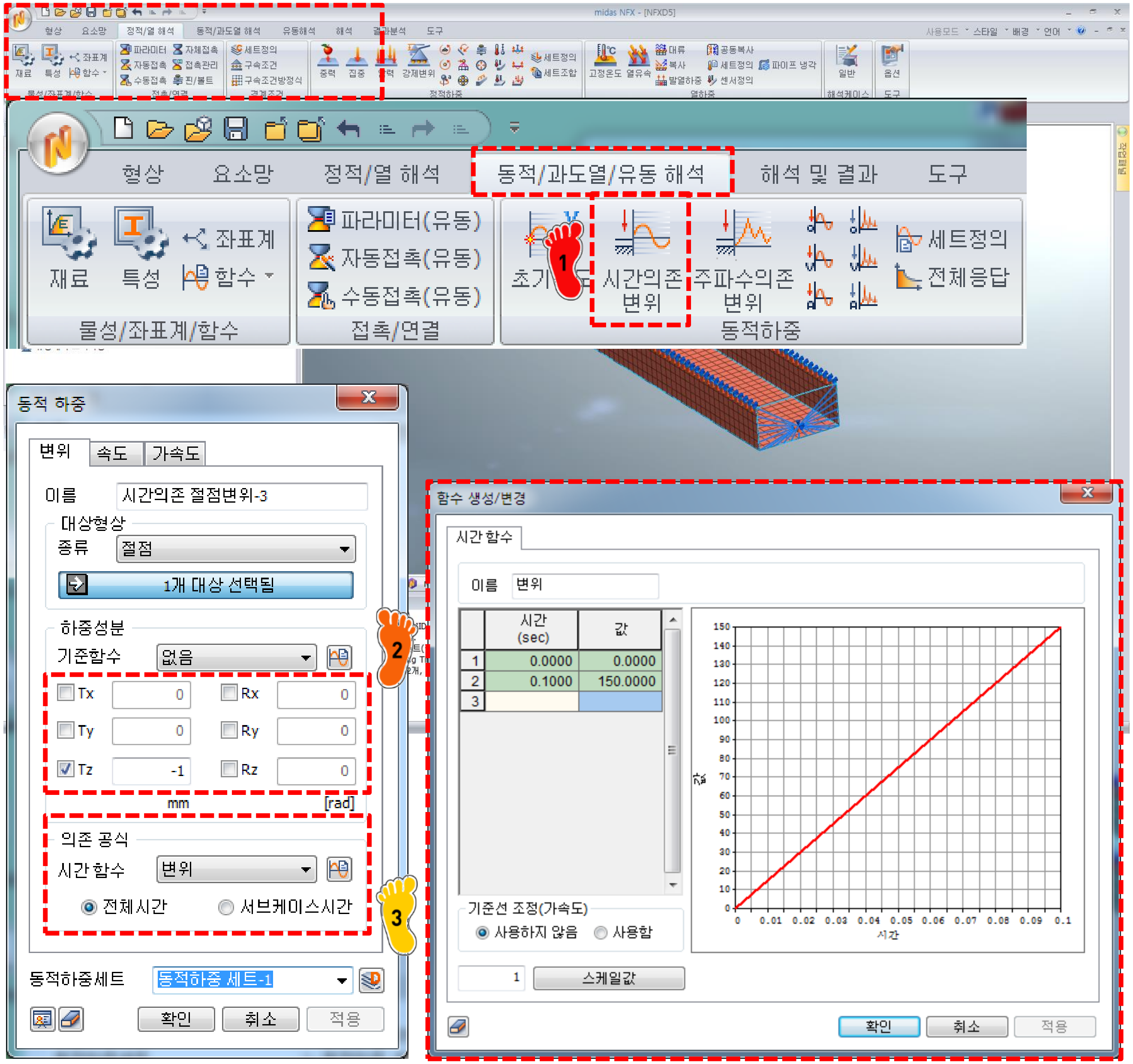
빔의 끝부분에 경계조건 설정
(핀구속)

빔의 잘린 부분은 대칭 조건으로 경계조건 설정

강체의 중앙 부분의 절점은 부딪히는 방향의 자유도를 제외한 모든 자유도 구속

Copyright © Computational Design Lab. All rights reserved.

구속조건 및 하중조건 설정 (2)



1. 동적/과도열/유동 해석 탭 메뉴에서 동적하중 메뉴의 시간의존 변위 클릭

2. 강체 중간의 절점 클릭

   Tz: -1 입력

3. 시간 함수 생성

   0초일 때 0

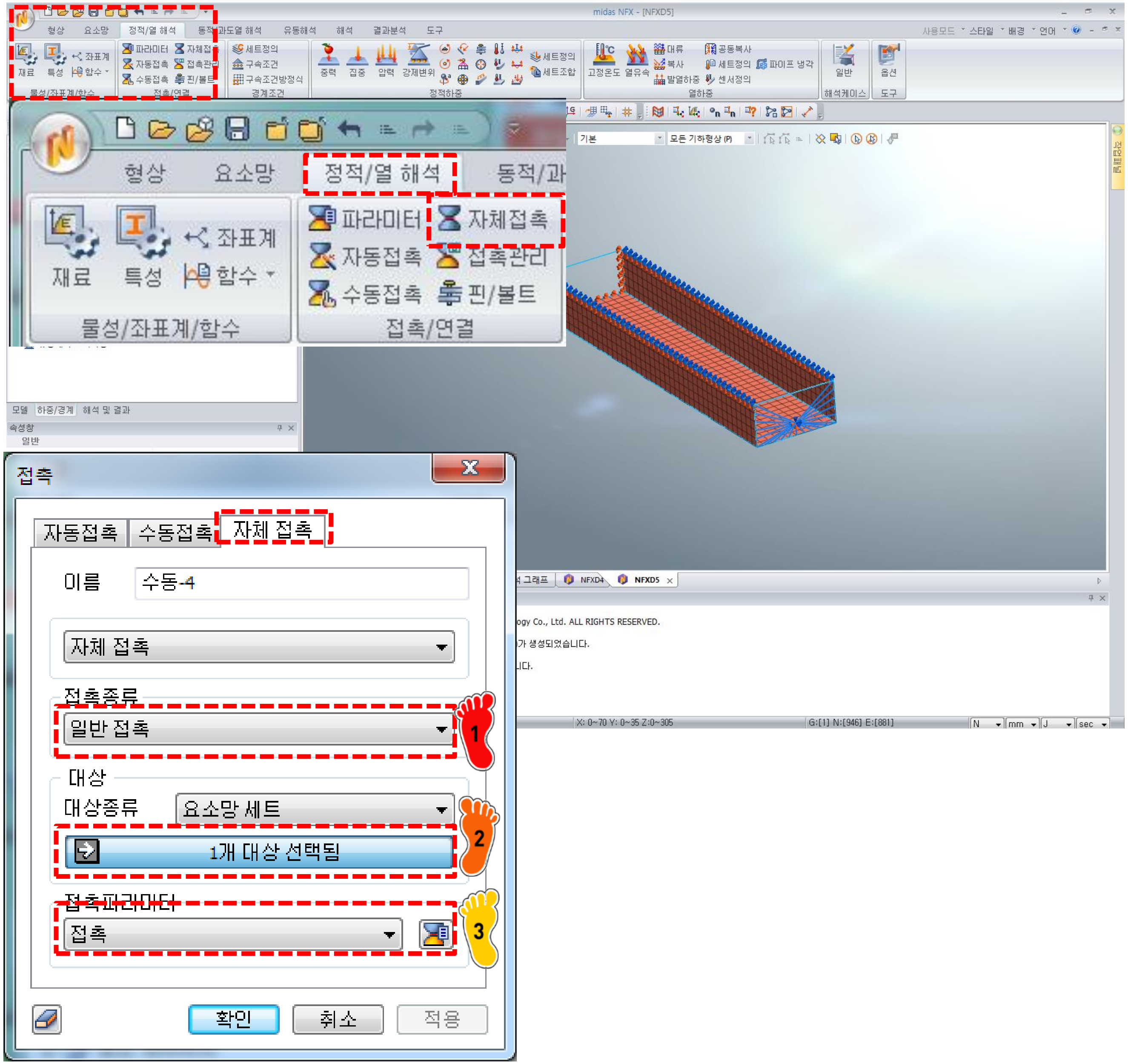
   0.1초일 때 150

   의 값으로 설정

   확인

Copyright © Computational Design Lab. All rights reserved.

접촉조건 설정 (2)

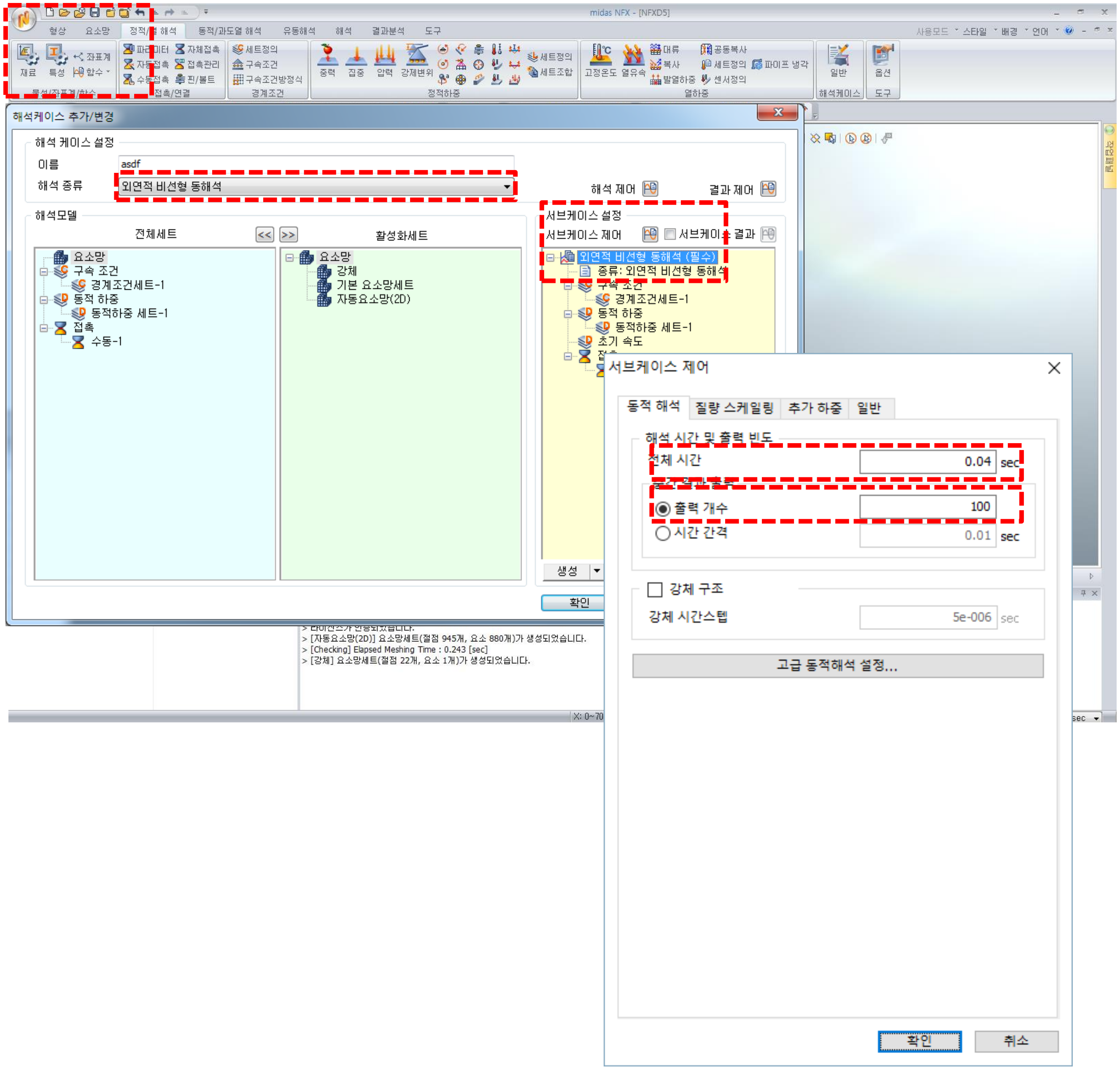


1. 접촉 메뉴의 자체접촉 탭 메뉴에서 일반접촉으로 접촉 종류 변경
2. 빔 형상 선택
3. 앞선 예제와 같이 접촉 파라미터 변경 (마찰계수0.2)

확인

Copyright © Computational Design Lab. All rights reserved.

해석 케이스 정의 및 해석 실행



1

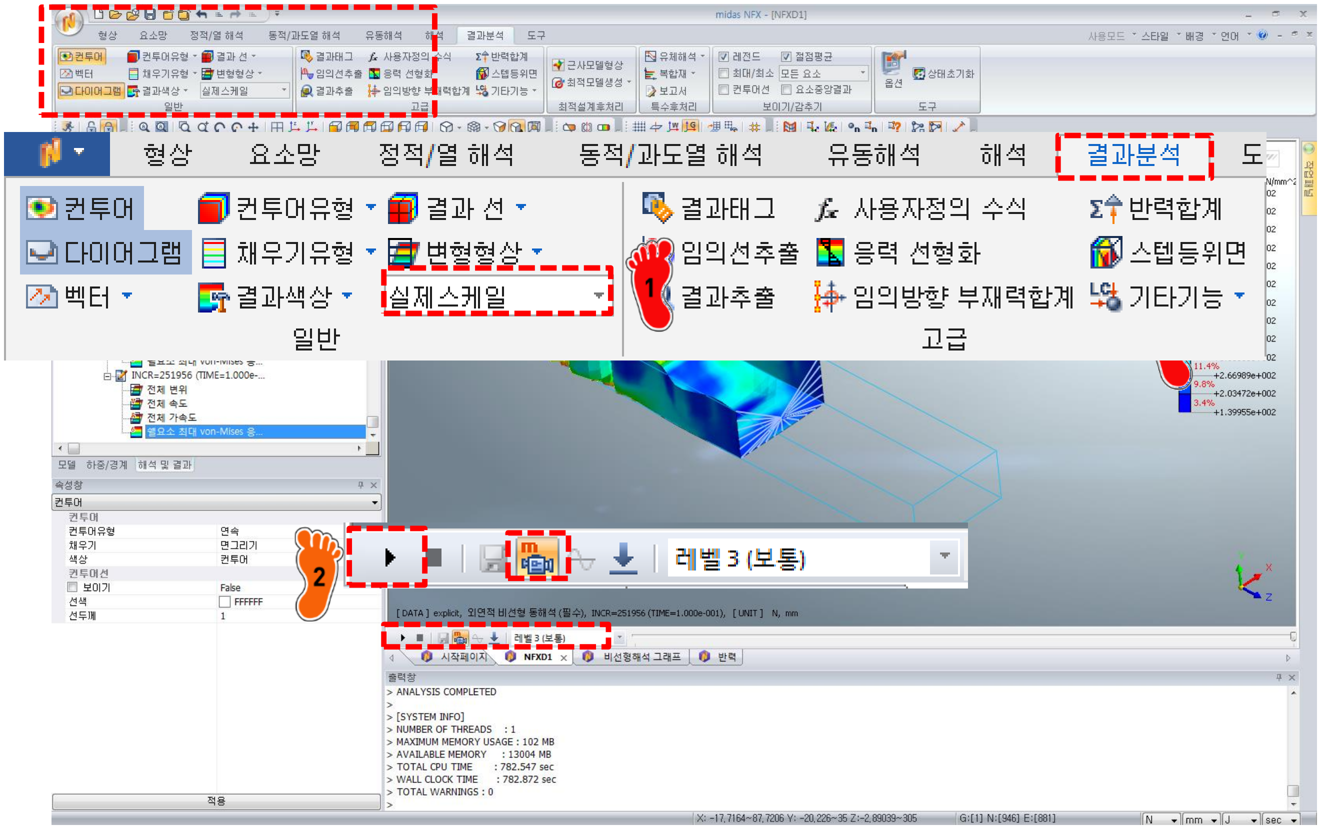
해석 케이스 외연적 비선형 동해석 선택

전체 시간 0.04 sec
출력 개수 100으로 변경

해석 수행
(옵션에 해석/결과 에서 프로세서 개수 확인)

Copyright © Computational Design Lab. All rights reserved.

후처리 (1)

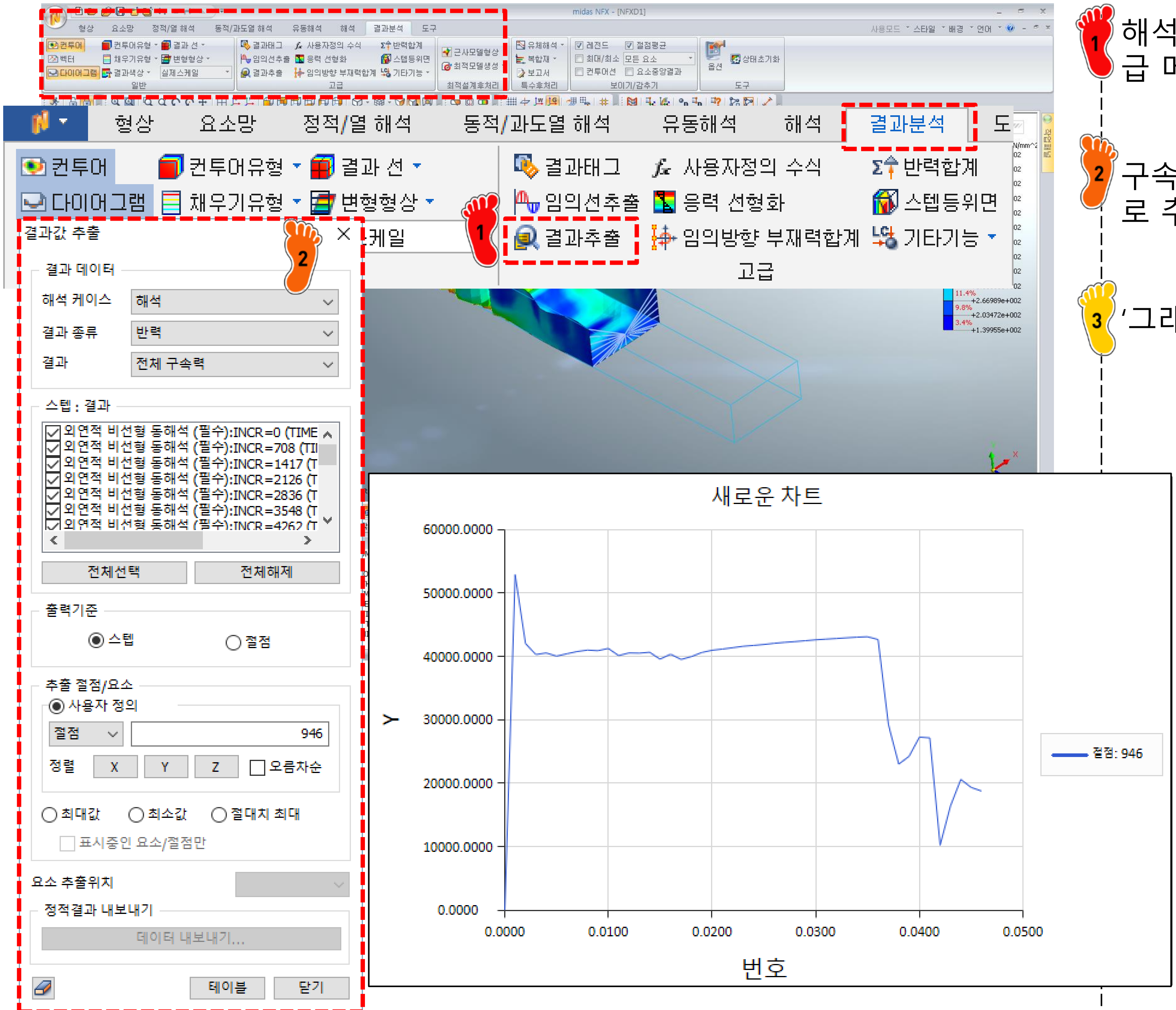


해석 및 결과 탭 메뉴의 일반 메뉴에서 변형 스케일을 실제스케일로 변경

멀티-스텝 애니메이션 녹화 클릭 후 재생을 통하여 동영상으로 확인

Copyright © Computational Design Lab. All rights reserved.

후처리 (2)



1. 해석 및 결과 탭 메뉴의 고급 메뉴에서 결과추출 클릭
2. 구속력으로 변경 뒤 테이블로 추출
3. '그래프 보기'로 데이터 확인

Copyright © Computational Design Lab. All rights reserved.

후처리 (3)

Analytic solution

$$P_M = 386 t^{1.86} b^{0.14} \sigma_Y^{0.57} = 30237\ \text{N}$$

$$P_{MAX} = 2.87 P_M = 86780\ \text{N}$$

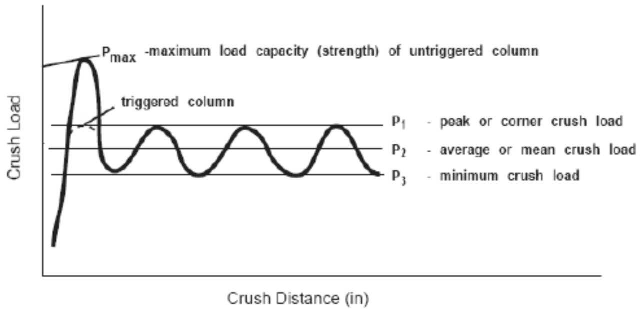
$$P_1 = 1.42 P_M = 42936\ \text{N}$$

$$P_2 = 0.57 P_M = 17235\ \text{N}$$

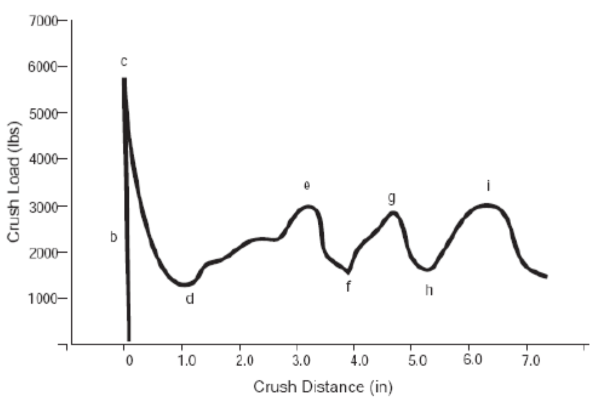
FEM solution

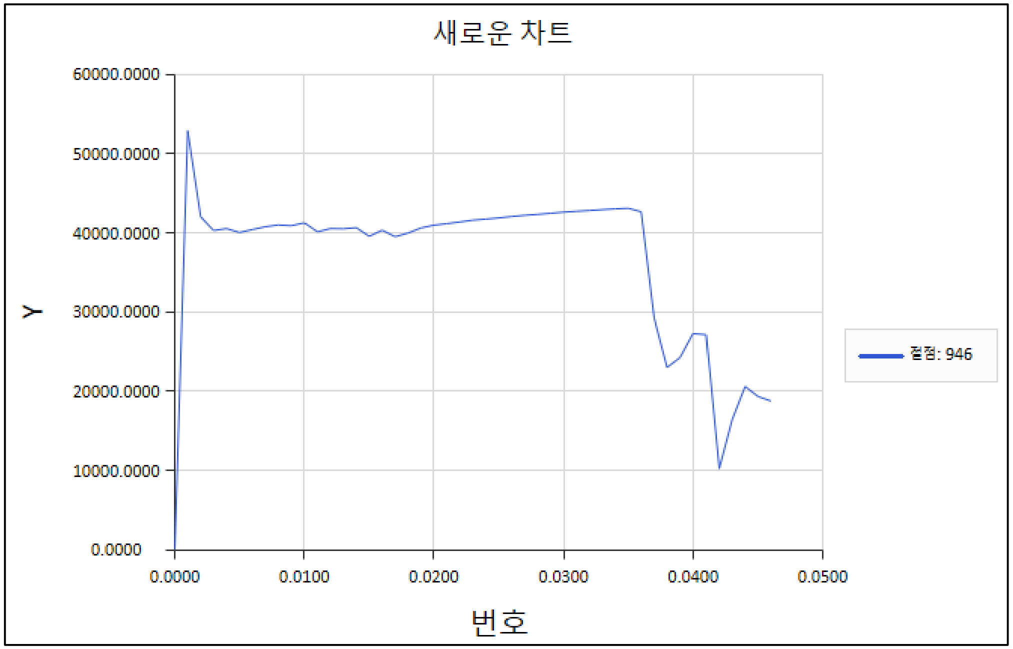
$$P_{MAX} = 52886\ \text{N}$$

Ideal graph



Practical graph





Copyright © Computational Design Lab. All rights reserved.

숙제

예제에서 수행한 정 사각형의 정적 충돌 하중을 100%로 놓고, 나머지 형상 중 하나를 결정하여 평균 정적 충돌 하중을 구하시오.

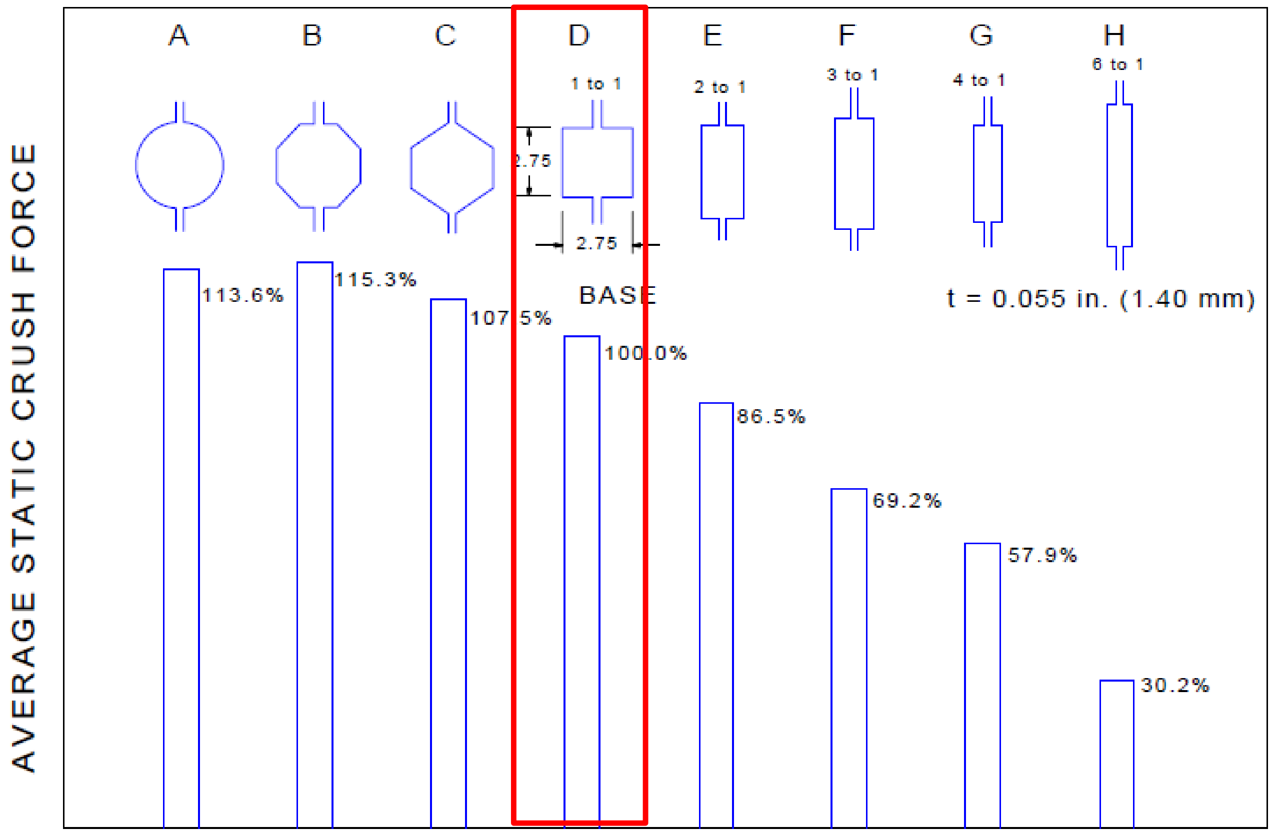


Figure 3.6.4-1 Average static crush force vs. section shape (All samples were the same mass and length)

Copyright © Computational Design Lab. All rights reserved.