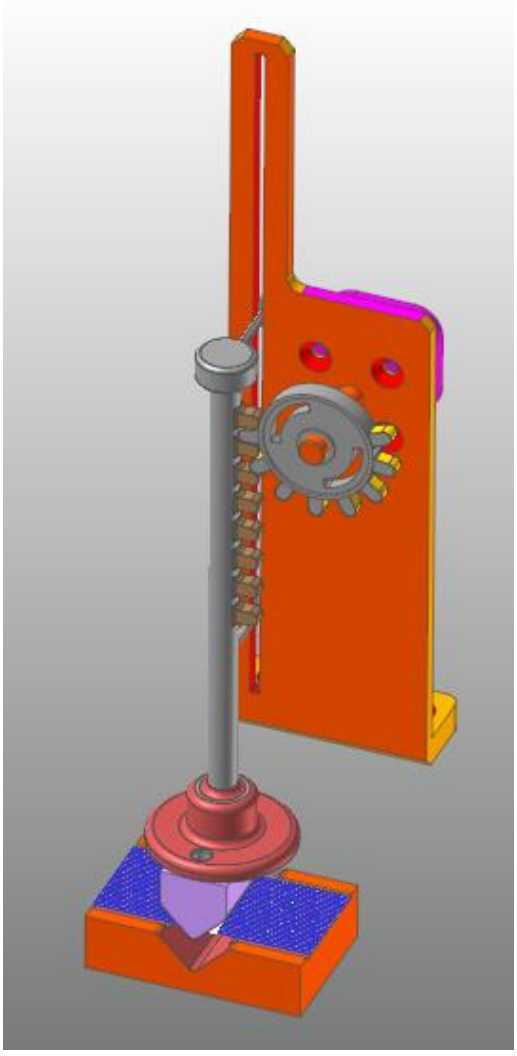
RECURDYN

Plasticity Bending Machine Tutorial (FFlex)



FunctionBay

Copyright © 2020 FunctionBay, Inc. All rights reserved.

User and training documentation from FunctionBay, Inc. is subjected to the copyright laws of the Republic of Korea and other countries and is provided under a license agreement that restricts copying, disclosure, and use of such documentation. FunctionBay, Inc. hereby grants to the licensed user the right to make copies in printed form of this documentation if provided on software media, but only for internal/personal use and in accordance with the license agreement under which the applicable software is licensed. Any copy made shall include the FunctionBay, Inc. copyright notice and any other proprietary notice provided by FunctionBay, Inc. This documentation may not be disclosed, transferred, modified, or reduced to any form, including electronic media, or transmitted or made publicly available by any means without the prior written consent of FunctionBay, Inc. and no authorization is granted to make copies for such purpose.

Information described herein is furnished for general information only, is subjected to change without notice, and should not be construed as a warranty or commitment by FunctionBay, Inc. FunctionBay, Inc. assumes no responsibility or liability for any errors or inaccuracies that may appear in this document.

The software described in this document is provided under written license agreement, contains valuable trade secrets and proprietary information, and is protected by the copyright laws of the Republic of Korea and other countries. UNAUTHORIZED USE OF SOFTWARE OR ITS DOCUMENTATION CAN RESULT IN CIVIL DAMAGES AND CRIMINAL PROSECUTION.

Registered Trademarks of FunctionBay, Inc. or Subsidiary

RecurDyn is a registered trademark of FunctionBay, Inc.

RecurDyn/Professional, RecurDyn/ProcessNet, RecurDyn/Acoustics, RecurDyn/AutoDesign, RecurDyn/Bearing, RecurDyn/Belt, RecurDyn/Chain, RecurDyn/CoLink, RecurDyn/Control, RecurDyn/Crank, RecurDyn/Durability, RecurDyn/EHD, RecurDyn/Engine, RecurDyn/eTemplate, RecurDyn/FFlex, RecurDyn/Gear, RecurDyn/DriveTrain, RecurDyn/HAT, RecurDyn/Linear, RecurDyn/Mesher, RecurDyn/MTT2D, RecurDyn/MTT3D, RecurDyn/Particleworks I/F, RecurDyn/Piston, RecurDyn/R2R2D, RecurDyn/RFlex, RecurDyn/RFlexGen, RecurDyn/SPI, RecurDyn/Spring, RecurDyn/TimingChain, RecurDyn/Tire, RecurDyn/Track_HM, RecurDyn/Track_LM, RecurDyn/TSG, RecurDyn/Valve

are trademarks of FunctionBay, Inc.

Edition Note

This document describes the release information of **RecurDyn V9R4**.

목차

개요 4
목적 4
필요 요건 5
과정 5
예상 소요 시간 5
초기 모델 불러오기 6
목적 6
예상 소요 시간 6
RecurDyn 모델 불러오기 7
초기 Suspension 모델 시뮬레이션의 실행 9
결과 보기 9
FFlex body 생성하기 10
목적 10
예상 소요 시간 10
Box Geometry 생성하기 11
Box Mesh 생성하기 12
Elastic Analysis 수행하기 16
목적 16
예상 소요 시간 16
Dynamic Modeling 수행하기 17
Elastic Analysis 수행하기 21
Plastic Analysis 수행하기 25
목적 25
예상 소요 시간 25
Plastic Modeling 수행하기 (1) 26
Plastic Analysis 수행하기 (1) 29
Plastic Modeling 수행하기 (2) 33
Plastic Analysis 수행하기 (2) 36
결과 분석 및 검토 40
목적 40
예상 소요 시간 40
Plastic Analysis 결과 분석하기 41
참고 설명 44

Chapter 1

개요

절곡기(Bending Machine)은 금속판을 상하 형틀에 끼워 압력을 가하여 굽히는 기계로서, 형(bending tool)을 교체하여 여러 종류의 각도나 형상으로 굽힐 수 있도록 만들어 주는 기계입니다.

이때, 절곡기를 통해 형성된 금속판은 설정된 형틀에 맞게 변형이 발생하게 되는데, 이는 금속의 재료의 성질 중, 일정 하중 이상 적용하였을 때 탄성영역을 벗어나 영구변형이 발생되는 소성(Plasticity) 특성이 반영된 결과입니다. 따라서, 이와 같은 금속판의 거동을 확인하기 위해서는 일반적인 탄성해석(Elastic Analysis)이 아닌, 소성해석(Plastic Analysis)을 수행해야 합니다.

따라서, 소성해석(Plastic Analysis)를 수행하는 목적은 관심이 있는 부재 즉, RecurDyn 에서 모델링된 Flexible Body 에 대하여 일반적으로 설정되는 탄성 거동이 아닌 소성 거동을 나타내는 재질 특성(Material Property)을 적용함으로써 실제로 발생하게 될 물체의 거동을 Simulation 을 통해 예측하는 것입니다.

그러므로 본 교재에서는 Flexible body 로 구성된 동역학 시스템에 대해서 Plastic Material 을 어떻게 적용하여 소성해석을 수행할 수 있는지 살펴보고, 기존의 Elastic Material 를 적용하여 결과를 도출하였을 때와 차이점을 바탕으로 소성해석의 특징에 대하여 쉽게 이해할 수 있도록 설명하였습니다.

목적

본 교재에서 다루고자 하는 내용은 다음과 같습니다.

- 탄성해석을 통한 Flexible Body 거동 분석
- 소성해석을 수행하기 위한 필요조건
- 소성 재질을 적용하는 방법 및 특징
- 소성해석 결과 분석 방법

- 탄성해석과 소성해석 결과 비교 분석

필요 요건

본 교재는 RecurDyn 에서 제공되고 있는 Basic Tutorial 및 FFlex 와 RFlex Tutorial 을 숙지한 사용자를 위한 것입니다. 따라서 본 교재를 사용하기 위해서는 앞서 언급된 교재를 선행해야 본 교재의 이해를 높일 수 있습니다. 또한 Dynamics 및 Finite Element Method 에 대한 이해를 필요로 합니다.

과정

본 교재는 다음과 같은 순서로 구성되어 있으며, 수행 예상 시간은 다음과 같습니다.

과정	시간(분)
초기 모델 불러오기	5
FFlex body 생성하기	20
Elastic Analysis 수행하기	10
Plastic Analysis 수행하기	20
결과 분석 및 검토	10
총합	**65**

예상 소요 시간

65 분

Chapter 2

초기 모델 불러오기

목적

초기 모델을 열어 시뮬레이션을 실행하고, Bending Machine 구동 동작을 관찰해봅시다.

예상 소요 시간

5 분

RecurDyn 모델 불러오기

RecurDyn 실행 및 초기 모델 불러오기**:**

1. 바탕화면에서 **RecurDyn** 아이콘을 더블클릭하면, RecurDyn 이 실행되면서 **Start RecurDyn** 다이얼로그 박스가 나타납니다.
2. **Start RecurDyn** 다이얼로그 박스가 나타나면 닫아줍니다.
3. **File** 메뉴에서 **Open** 을 클릭합니다.
4. **Plasticity** 튜토리얼 경로에서 **Plasticity_Bending_Machine_Start.rdyn** 을 선택합니다. (파일 경로: <Install Dir> \Help\Tutorial\Flexible\FFlex\Plasticity_Bending_Machine).
5. **Open** 을 클릭합니다. 아래의 그림처럼 모델이 보여집니다.

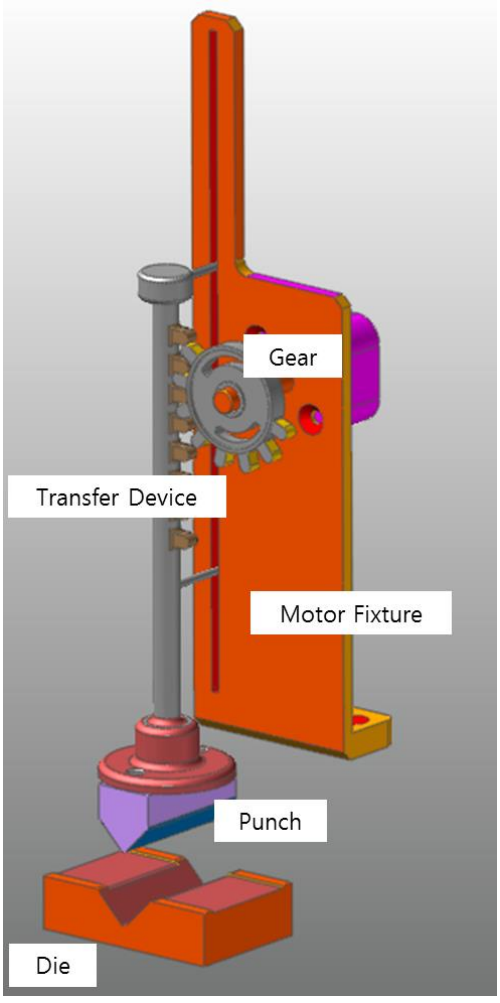
모델의 구성은 다음과 같습니다.

오른쪽 그림은 절곡기(Bending Machine)의 일종으로, 이송장치(Transfer Device)를 기어와 모터를 사용하여 윗 방향으로 이송시켜 펀치(Punch)의 자유낙하에 의한 자중으로 금속 판재에 대해 굽힘 가공을 수행하는 기기입니다.

오른쪽 그림에는 가공할 판재가 모델링이 생성되어 있지 않기 때문에 본 교재를 통해서 판재를 Flexible Body 로 생성하여 적용하는 방법을 다음 과정에서 배우게 됩니다. 이때, 소성재질을 갖는 판재는 다이(Die) 상부에 놓이게 되며, 자중에 의해 낙하되는 펀치(Punch)에 의해 판재에 힘을 가하게 됩니다.

이후 판재는 다이(Die)의 형태에 준한 모양으로 굽힘이 이루어지게 되며, 굽힘 가공이 이루어지고 난 뒤에는 펀치(Punch)는 이송장치의 돌출부(Teeth)와 모터 장착대(Motor Fixture)에 장착된 기어(Gear)의 맞물림으로 인해 다시 윗 방향으로 이송되게 됩니다.

따라서 본 교재에서 사용되는 모델의 구성은 크게 다이, 펀치, 이송장치, 모터 장착대, 기어로 이루어지게 되며, 판재에 대한 모델링은 교재 실습을 통해 생성하게 됩니다.



모델 저장하기**:**

1. **File** 메뉴에서, **Save As** 를 클릭합니다.

   (튜토리얼 경로에서는 직접 시뮬레이션 실행이 불가하므로 다른 경로에 본 모델을 다시 저장해야 합니다.)

초기 **Suspension** 모델 시뮬레이션의 실행

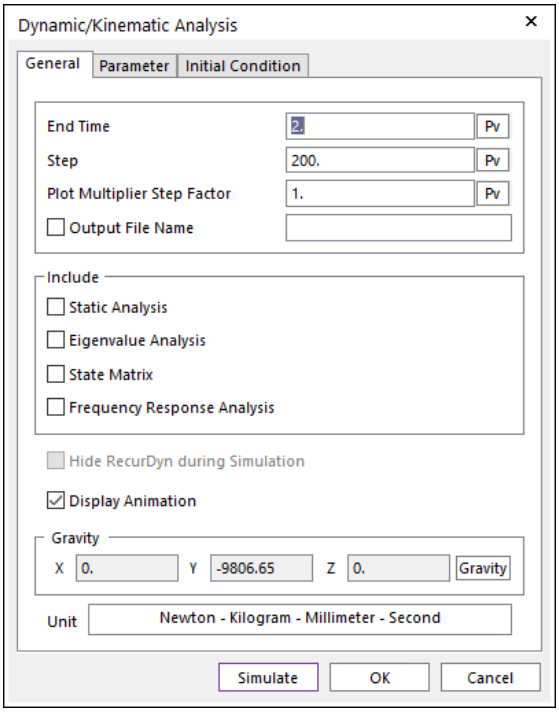
불러들인 모델의 동작이 실행되는 것을 이해하기 위해서 모델에 대한 초기 시뮬레이션을 실행합니다.

초기 시뮬레이션 실행하기**:**

1. **Analysis** 탭의 **Simulation Type** 그룹에서, **Dyn/Kin** 를 선택합니다.

   Dynamic/Kinematic Analysis 대화상자가 나타납니다.

2. 다음과 같이 **End Time** 과 **Step** 의 수를 정의합니다.
   - **End Time**: 2
   - **Step**: 200
   - **Plot Multiplier Step Factor**: 1
3. **Simulate** 를 클릭합니다.



결과 보기

결과 보기**:**

Analysis 탭의 Animation Control 그룹에서 **Play** 버튼을 누릅니다.

모터 장착대에 부착된 기어 구동에 의해 이송장치가 윗 방향으로 움직이는 것을 확인할 수 있습니다. 이후, 기어의 이와 맞물림이 발생되지 않는 영역에서 펀치(Punch)는 자유낙하를 수행하여 다이(Die)와의 충돌이 발생합니다. 시간이 지남에 따라 기어와 이송장치와의 맞물림이 다시 발생하게 되어 이송장치와 펀치(Punch)는 다시 윗 방향으로 이송되는 것을 확인할 수 있습니다.

Chapter 3

FFlex body 생성하기

앞서 설명한 바와 같이, 현재 RecurDyn 모델에서는 소성해석을 수행하기 위한 판재(Plate) 모델링이 생성되어 있지 않습니다. 따라서 판재에 대한 유연체(Flexible Body) 생성을 위해 강체를 RecurDyn 에서 제공하는 Box Geometry 를 통해 생성한 후, Mesher 를 이용하여 유연체를 생성하는 방법을 배워보도록 하겠습니다. 또한 판재와 다이(Die), 펀치(Punch)와의 Contact 를 정의하는 과정을 수행하도록 하겠습니다.

목적

본 장에서는 **RecurDyn/FFlex**(Full Flex)에서 제공하는 Mesher 를 사용하여 새롭게 생성된 Rigid Body 를 Flexible body 로 변경하는 방법을 배우게 됩니다.

예상 소요 시간

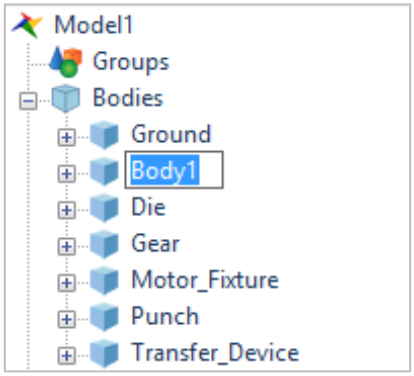
20 분

Box Geometry 생성하기

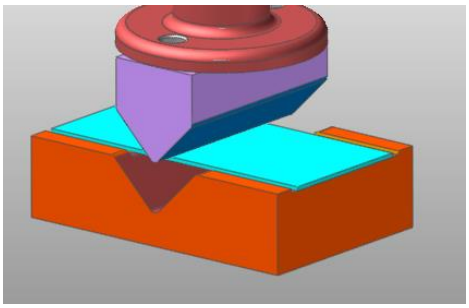
1. **Professional** 탭의 **Body** 그룹에서 **Box** icon 을 선택합니다.
2. 모델링 옵션에서 **Point, Point** 로 설정된 상태에서, **Command Input** 창에 아래의 값을 입력합니다.

   -75, 0, 35 (입력 후, Enter Key 입력)

   75, -2, -35 (입력 후, Enter Key 입력)
3. 입력이 완료되면, 아래 그림과 같이 Box Geometry 가 생성됨을 확인할 수 있으며,



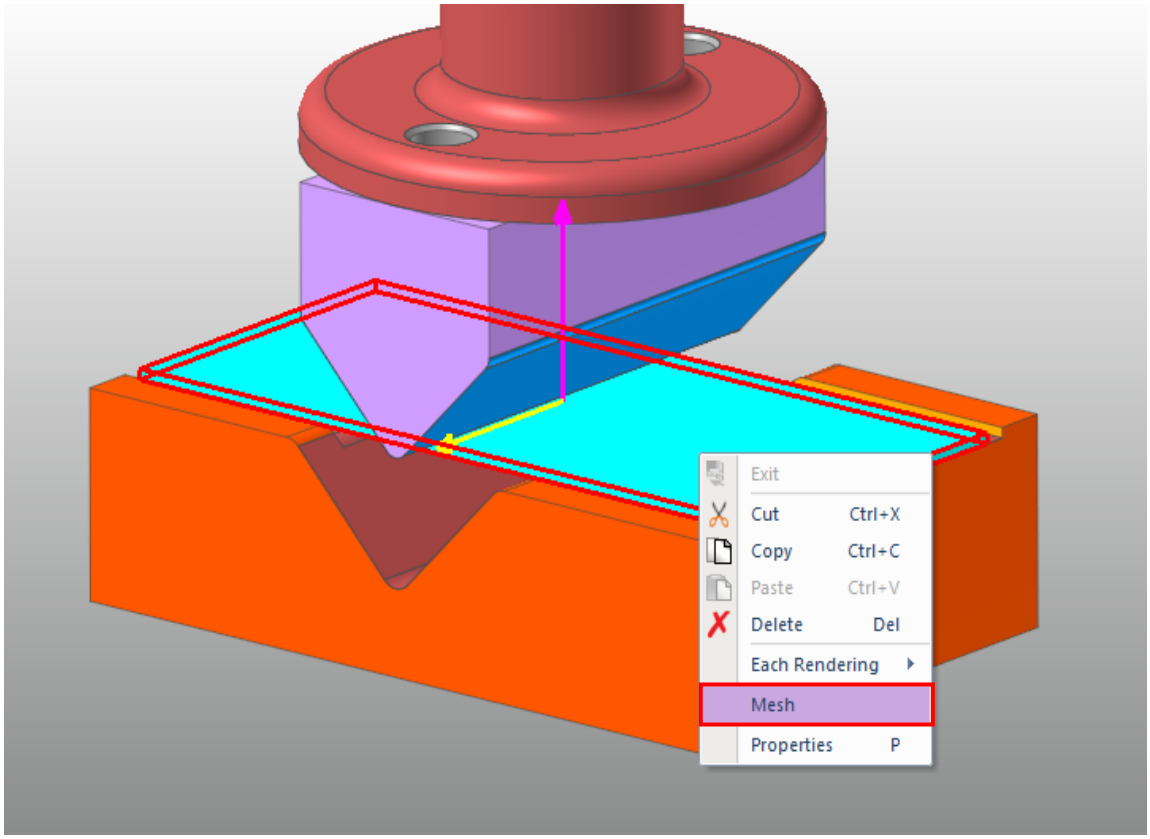
Database 에서 생성된 **Body1** 의 이름을 **Plate** 로 변경합니다.



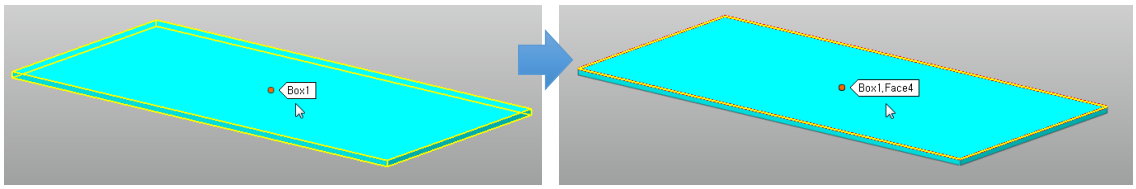
Box Mesh 생성하기

1. **Assembly** 모드에서 **Plate Body** 를 선택한 뒤, 아래 그림과 같이 마우스 오른쪽 버튼 Pop-up Menu 에서 **Mesh** 를 선택합니다.

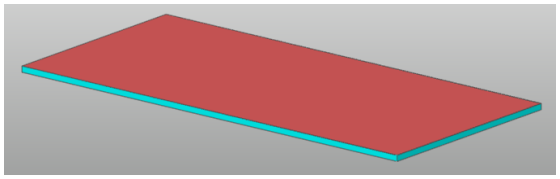
   아래 그림처럼 Mesh 모드로 진입하여 **Plate Body** 만이 보여집니다.



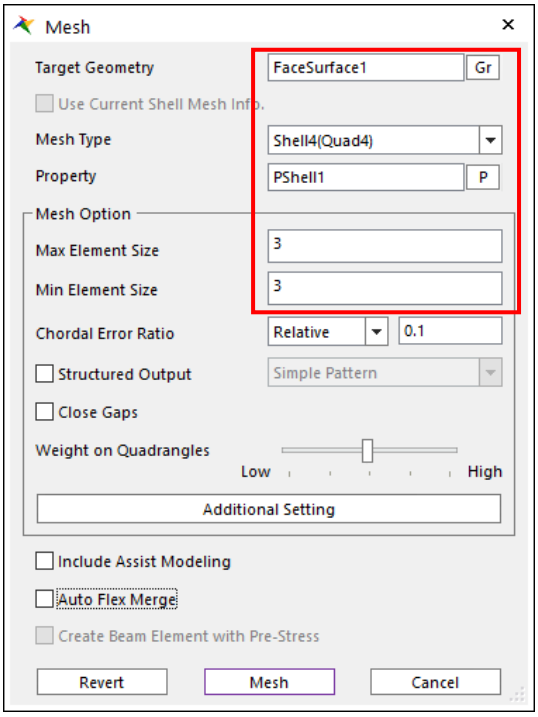
2. **Geometry** 탭의 **Surface** 그룹에서 **Face** 를 선택합니다.
3. **Box1** 을 선택하면 FaceSurf Operation Dialog Box 가 나타나고, 이 상태에서 Box 의 윗면 **Box1.Face4** 를 선택합니다.



4. Dialog Box 에서 **Face4** 가 아래의 그림과 같이 나타남을 확인한 뒤, OK 버튼을 누르면 **FaceSurface1** 이 새롭게 생성됨을 확인할 수 있습니다.

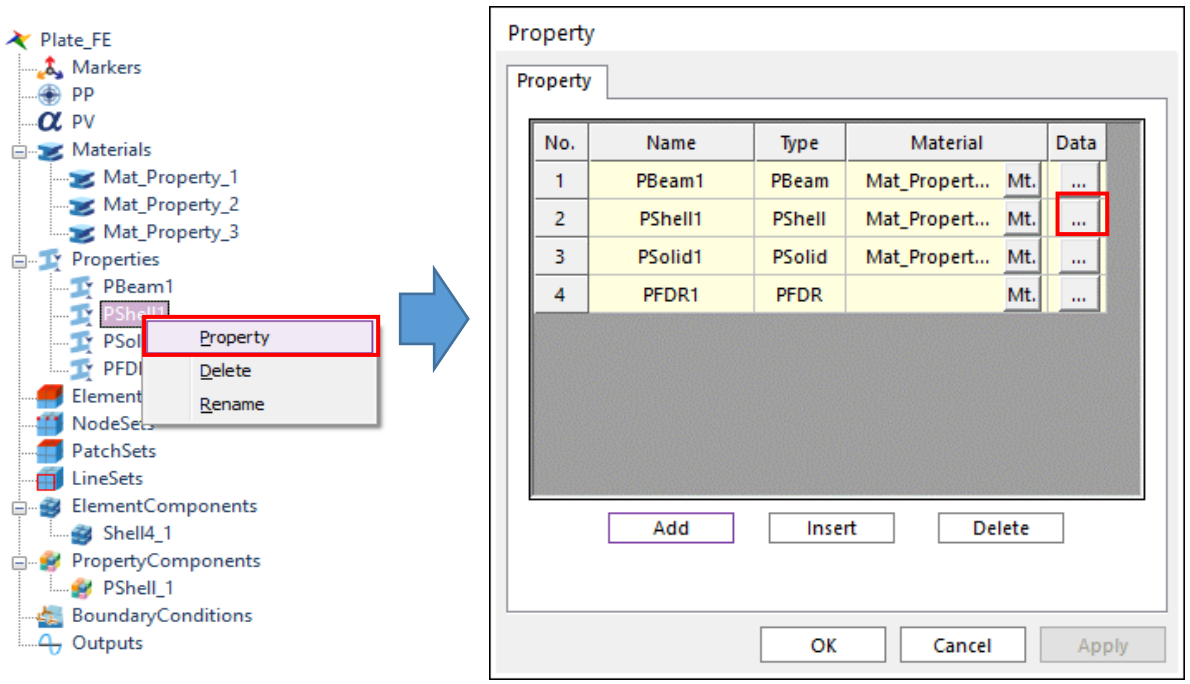


5. **Mesher** 탭으로 이동하여 **Mesh** 아이콘을 선택합니다. 선택과 동시에 아래와 같이 Mesh Dialog 가 나타납니다.

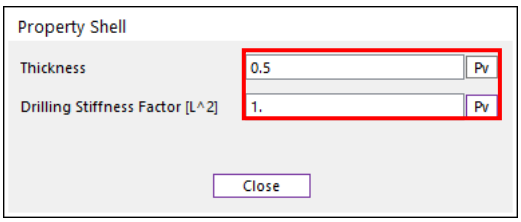


6. **Mesh Dialog** 에서 다음과 같이 변경합니다.
   - **Target Geometry** 에서 앞서 생성된 **FaceSurface1** 을 Working Window 에서 선택합니다.
   - **Mesh** Dialog 에서 **Mesh Type** 을 그림과 같이 **Shell4(Quad4)**로 선택합니다.
   - **Mesh Option** 에서 **Max Element Size** 와 **Min Element Size** 를 각각 3, 3 으로 설정합니다.
   - **Mesh** 버튼을 누릅니다.
   - **Cancel** 버튼을 누릅니다.

7. 새롭게 생성된 **Plate_FE** 의 모델의 **Database** 에서 아래 그림과 같이, **PShell1** Property Dialog Box 를 띄웁니다.

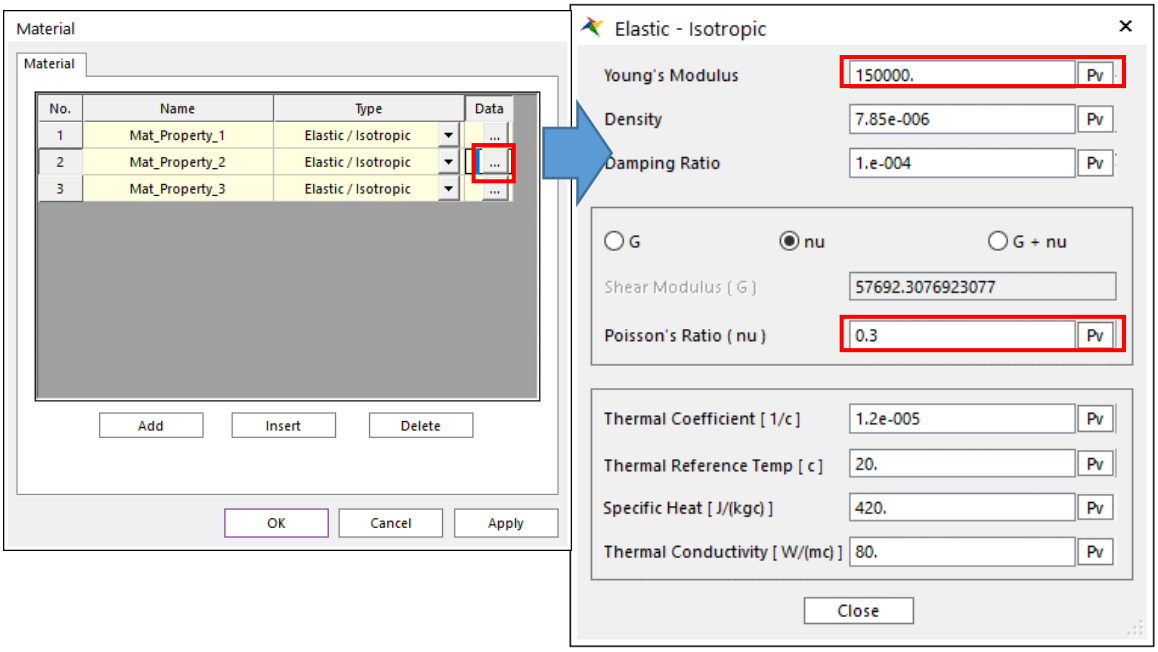


8. **Property** Dialog Box 에서 No.2 에 속한 PShell1 의 **...** 버튼을 누른 후, 새롭게 나타난 **Property Shell** Dialog Box 에서 **Thickness** 를 기존의 10 에서 **0.5** 로 변경하고 난 뒤, Close 버튼을 누릅니다.

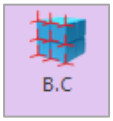


Property Dialog Box에서 No.2에 속한 PShell1의 **Mt.** 버튼을 눌러 아래와 같이, **Material** Dialog Box를 띄웁니다.

- 새롭게 나타난 **Material** Dialog Box 에서 No.2 에 속한 **...** 버튼을 눌러 아래와 같이 설정을 변경합니다.

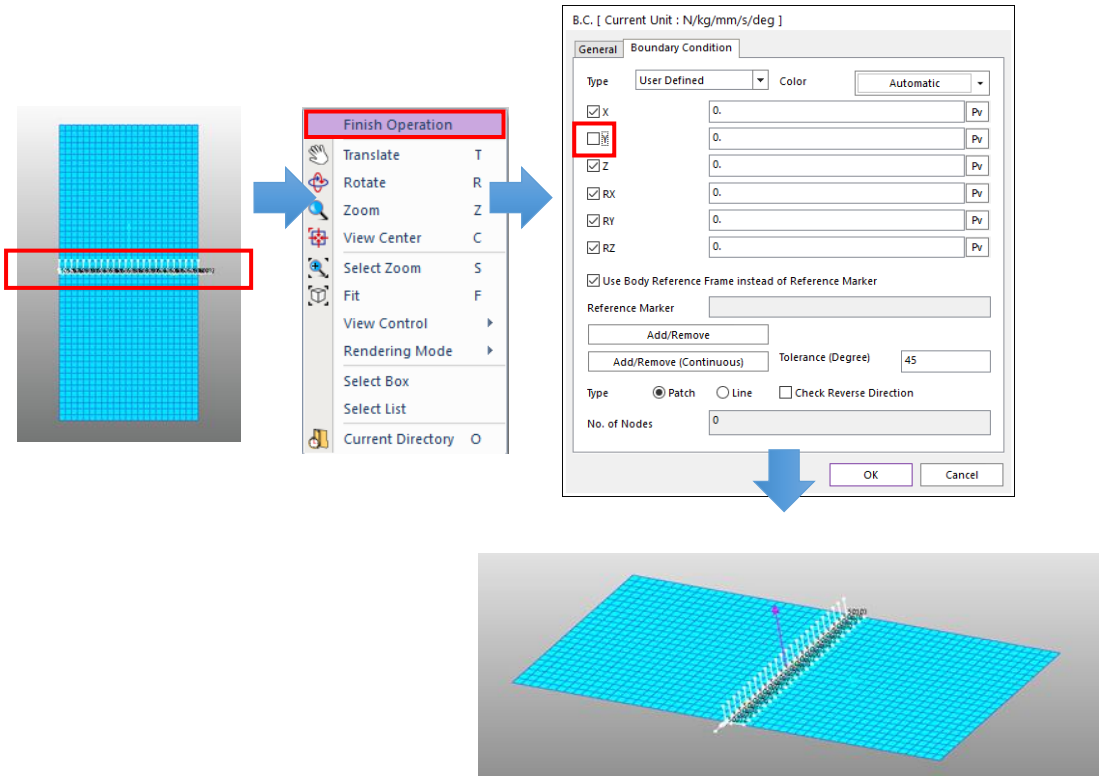


- **Young's Modulus** 의 값을 200,000 에서 **150,000** 으로 변경합니다.
- **Nu** 를 체크한 후, **Poisson's Ratio** 를 **0.3** 으로 변경한 후, Close 버튼을 누릅니다.
- 상위 Dialog Box 들의 OK 를 눌러 모든 Dialog Box 들을 닫습니다.



9. **FFlex Edit** 그룹에 포함된 **B.C** 아이콘을 선택한 후, 나타나는 Dialog Box 에서 **Add/Remove** 버튼을 누릅니다.
   - Keyboard 의 **Shift** key 와 **Z** key 를 동시에 눌러 Working Plane 을 **ZX** 평면으로 정렬한 후, 아래 그림과 같이 중앙에 위치한 노드들을 마우스를 이용하여 모두 선택합니다.
   - B.C 를 부여할 노드들의 선택이 완료되면, 마우스 오른쪽 버튼을 눌러 **Finish Operation** 을 선택합니다. ((참고로 선택된 노드 중, 제일 왼 쪽 Node ID 가 50103)

- 다시 나타난 B.C. Property Dialog Box 에서 아래 그림과 같이, **Y** 에 대한 선택을 해제합니다. 이후, **OK** 버튼을 누르면 화면에 새롭게 생성된 **Boundary Condition** 을 확인할 수 있습니다.



10. 다음의 방법을 이용하여 상위모드로 되돌아옵니다.

- Working 창에서 마우스 오른쪽 버튼을 눌러 Pop-up menu 에서 **Exit** 를 선택합니다.
- 또는 Mesher 탭의 Mesher 그룹에서 Exit Icon 를 선택합니다.

Tip: FFlex Body 로 모델링된 판재의 변형이 예상되지 않는 중앙부위 대해서 하중의 가해지는 방향인 Y 축에 대해서만 구속을 해제하고 나머지 DOF 에 대해서는 구속을 부여함으로써, 보다 빠른 해석 결과를 도출할 수 있도록 Boundary Condition 을 부여하였습니다.

Chapter 4

Elastic Analysis 수행하기

목적

본 장에서는 완성된 FFlex body 를 이용한 모델링 및 해석 수행을 완료하고 결과를 확인하는 방법을 배우게 됩니다.

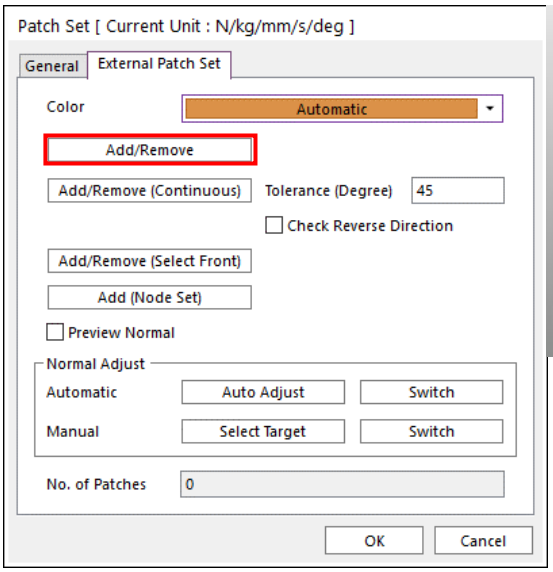
예상 소요 시간

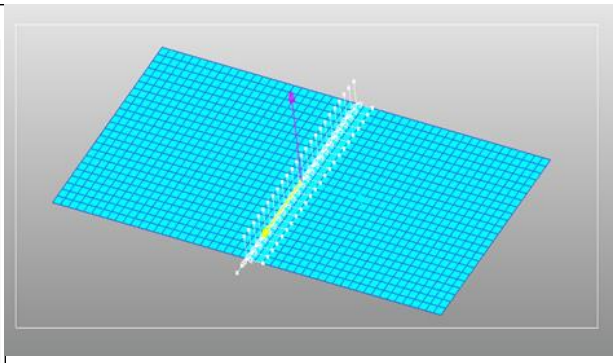
10 분

Dynamic Modeling 수행하기

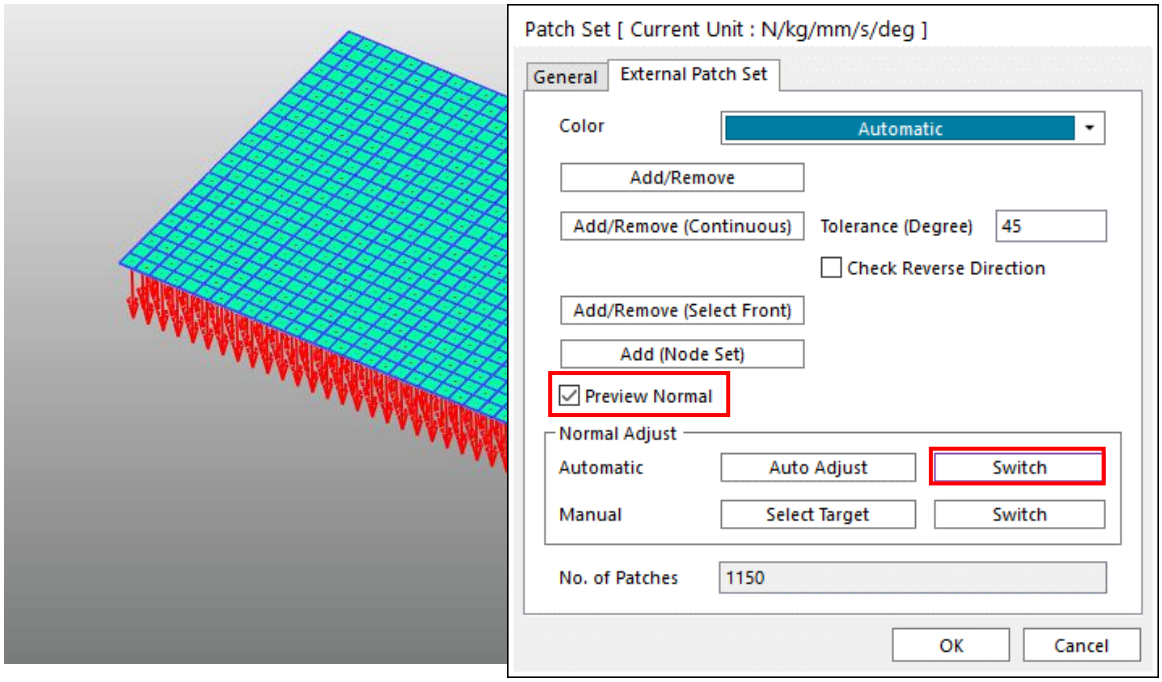
Patch Set 생성하기**:**

1. **Plate_FE** 를 마우스로 더블 클릭하여, **Body Edit mode** 로 진입합니다.
2. **FFlex Edit** 탭의 **Set** 그룹에서 **Patch Set Icon** 을 선택합니다.
3. 아래의 다이얼로그에서 **Add/Remove** 버튼을 클릭하고 Mouse 왼쪽 버튼을 누른 채 마우스를 Drag 하여 Body 전체를 선택합니다.





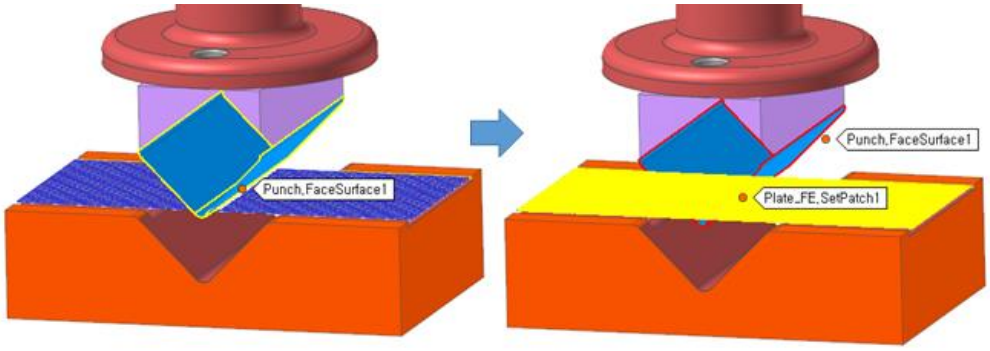
4. Mouse 오른쪽 버튼을 눌러 Pop-up Menu 에서 **Finish Operation** 을 선택합니다.
5. **Patch Set** Dialog 에서 **OK** 버튼을 누릅니다.
   - **Database** 에서 **SetPatch1** 이 생성되었음을 확인합니다.
6. 다시 **Patch Set** Icon 를 선택한 뒤, 3~ 4 번의 과정을 반복하여 또 하나의 Patch Set 을 생성합니다. 이후 나타난 Patch Set Dialog Box 에서 아래 그림과 같이, **Preview Normal** 의 체크 버튼을 활성화 시키고 Normal Adjust 영역의 Automatic 에 포함된 **Switch** 버튼을 누릅니다. (이 과정은 Shell 의 양면에 모두 Contact 을 정의하기 위해 2 개의 Patch Set 을 만드는 것입니다.)



7. **Patch Set** Dialog 에서 **OK** 버튼을 누릅니다.
   - **Database** 에서 **SetPatch2** 가 생성되었음을 확인합니다.
8. Patch Set 이 생성되었음을 확인한 뒤, **FFlex Edit** 탭의 **Exit** 그룹에서 **Exit Icon** 을 눌러 상위 모드로 되돌아옵니다.

Contact 생성하기**:**

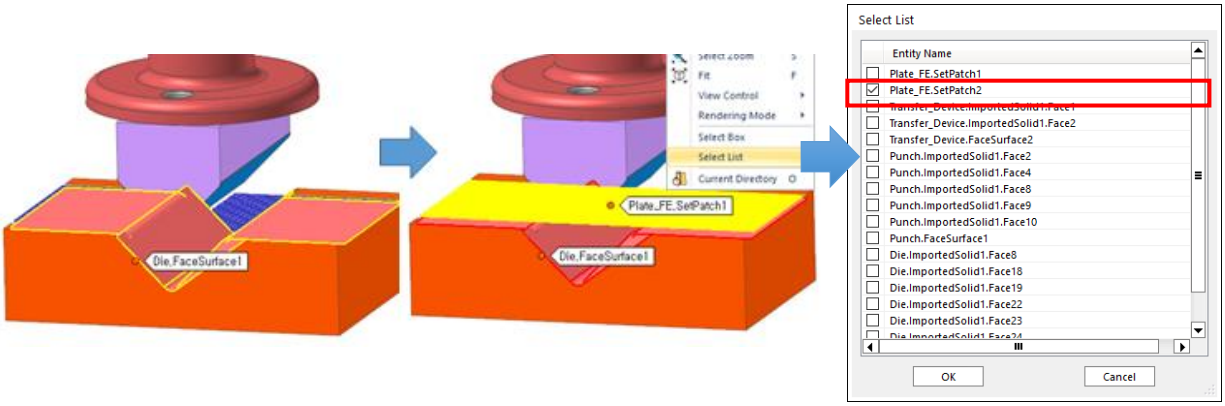
1. Professional 탭에서 Contact 그룹에 포함된 Geo Surface Contact 아이콘을 선택한 후, 모델링 옵션을 **Surface(PatchSet), Surface(PatchSet)** 로 변경합니다.
2. 아래 그림과 같이, Geo Surface Contact 의 Base Body 로 지정될 **Punch.FaceSurface1** 로 선택하고, Action Body 로 지정될 **Plate_FE.SetPatch1** 를 선택합니다. 이후, Database 에



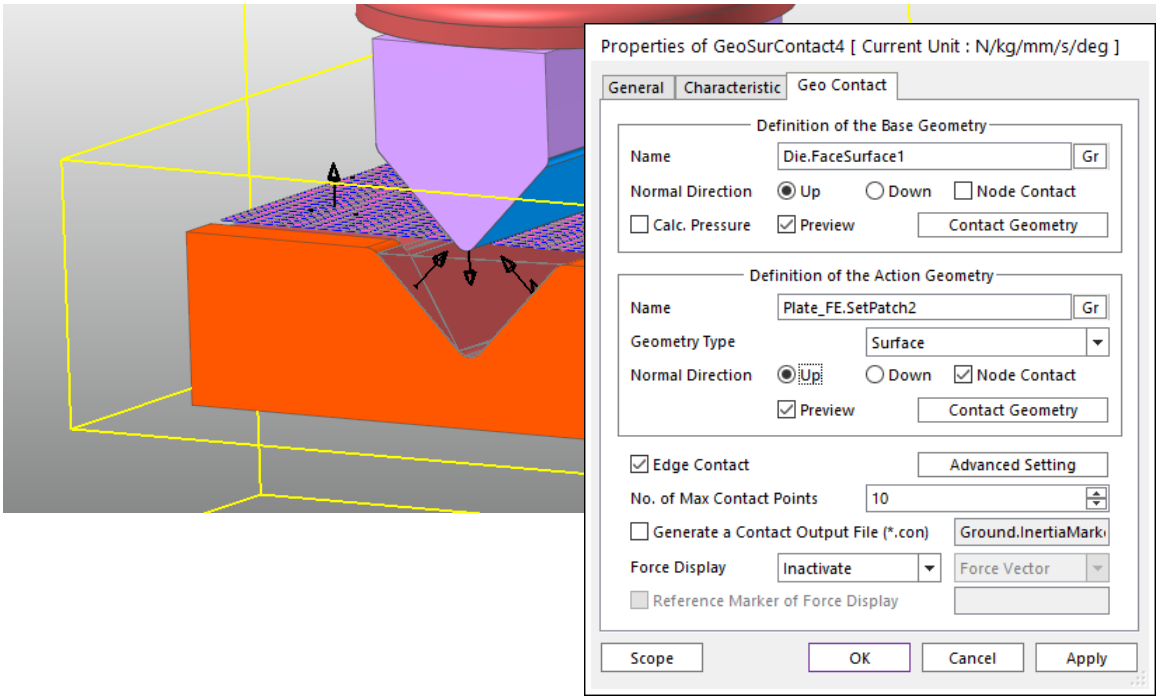
GeoSurContact3 이 생성된 것을 확인할 수 있습니다.

3. 다시 Geo Surface Contact 아이콘을 선택하고, 아래 그림과 같이 Geo Surface Contact 의 Base 와 Action Body 가 될 부분을 선택하여 **GeoSurfaceContact4** 를 생성합니다.

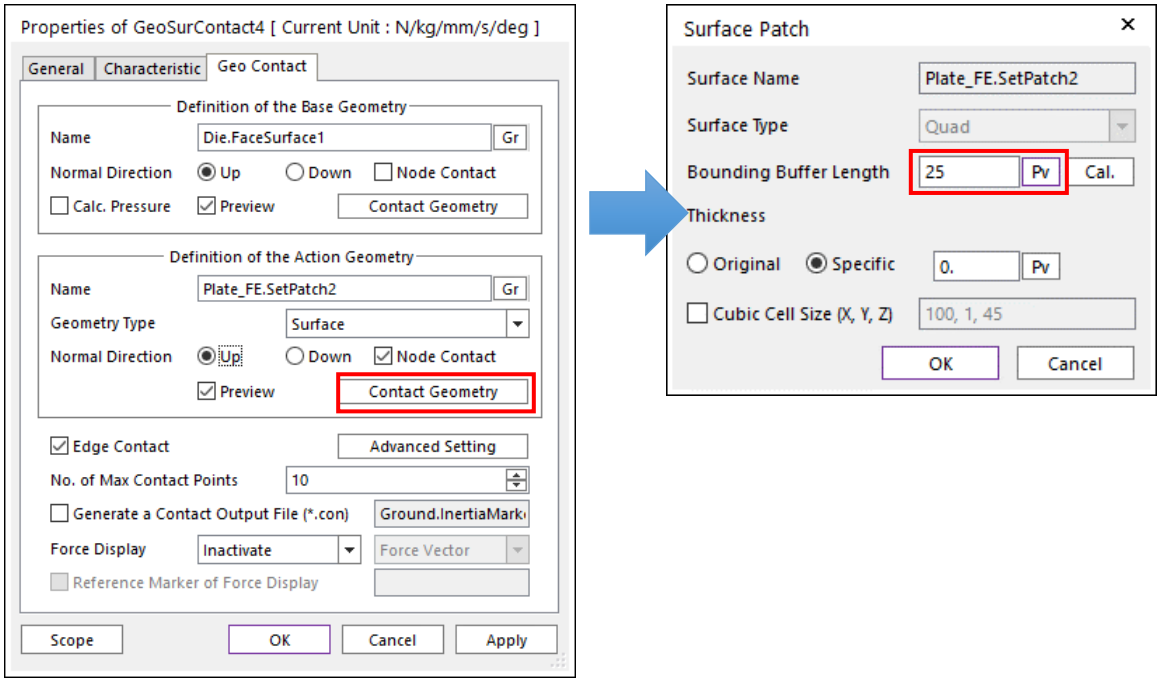
- Base Body 는 **Die.FaceSurface1** 을 선택합니다.
- Action Body 는 **Plate_FE.SetPatch2** 선택이 쉽지 않기 때문에 마우스 오른쪽 버튼을 눌러 Pop-up 메뉴에서 Select List 를 선택한 뒤, 나타난 Dialog Box 에서 **Plate_FE.SetPatch2** 를 체크하도록 합니다.



4. 생성된 Geo Surface Contact 가 올바르게 설정되어 있는지 확인하기 위하여 생성한 **GeoSurfaceContact4** 를 선택한 뒤, Property Dialog Box 가 나타나도록 합니다.



5. Definition of the Action Geometry 에 포함된 **Contact Geometry** 버튼을 눌러 **Surface Patch** Dialog Box 에서 **Bounding Buffer Length** 의 값을 **25** 로 변경합니다



6. **Database** 에 존재하는 **GeoSurContact3** 에 대해서는 **Normal Direction** 은 **Up** 으로 그대로 놓아둔 채, **Plate_FE.SetPatch1** 에 대한 **Bounding Buffer Length** 의 값만을 **25** 로 변경합니다.

Elastic Analysis 수행하기

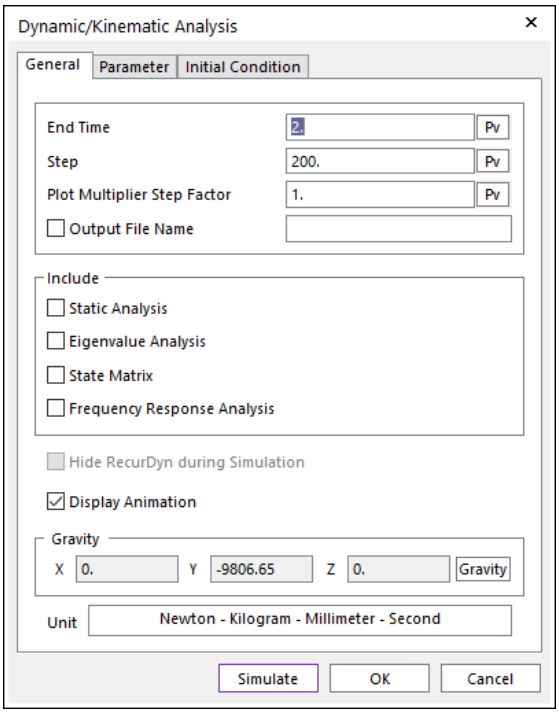
이전 과정을 통해서 생성된 FFlex Body 와 Elastic Analysis 를 수행하기 위한 Contact 정의를 바탕으로 시뮬레이션을 실행합니다.

시뮬레이션 실행하기:

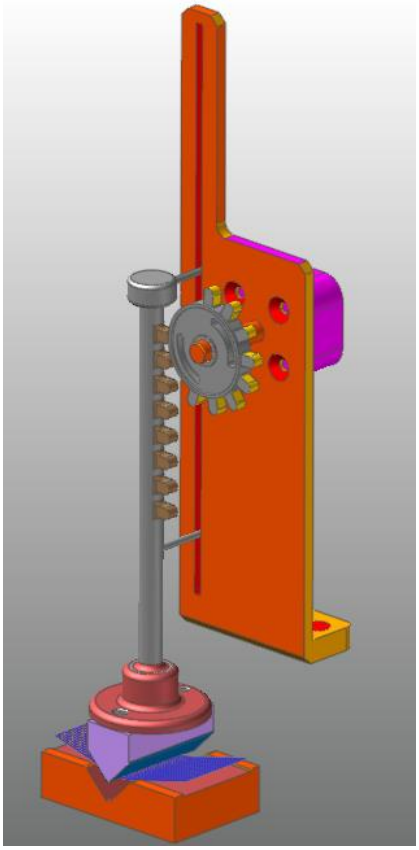
1. **Analysis** 탭의 **Simulation Type** 그룹에서, **Dyn/Kin** 를 선택합니다.

   Dynamic/Kinematic Analysis 대화상자가 나타납니다.

2. 다음과 같이 **End Time** 과 **Step** 의 수를 정의합니다.
   - **End Time**: 2
   - **Step**: 200
   - **Plot Multiplier Step Factor**: 1
3. **Simulate** 를 클릭합니다.



결과 보기**:**



Analysis 탭의 **Animation Control** 그룹에서 **Play** 버튼을 누릅니다.

기존 강체 모델링에서 펀치(Punch)와 다이(Die)의 접촉으로만 구동하던 모습과는 달리, 새로 생성된 Plate_FE 유연체가 펀치와 다이 사이에서 접촉이 발생함에 따라 이송장치(Transfer Device)의 거동이 다르게 나타남을 확인할 수 있습니다.

즉, Plate_FE 유연체의 탄성으로 인해 자유낙하로 하강하는 펀치에 마치 스프링 요소처럼 작용하여 이송장치가 크게 튀어 오르는 현상을 볼 수 있습니다. 이는 실제 현상에서는 일어나지 않는 결과입니다. 이와 같은 결과를 도출하게 된 이유는 Plate_FE 유연체의 속성이 소성이 아닌 탄성만이 존재하는 상태이기에, 큰 변형이 일어남에도 불구하고, 원위치로 되돌아 가려는 성질이 강하여 마치 판 스프링과 같은 역할을 하기 때문입니다.

이로 인해, 기어(Gear)의 도움 없이 상승한 이송장치는 기어와 이송장치의 구동 메커니즘으로 인해 자유낙하를 할 수 없는 상태에 이르게 됩니다.

따라서, 실제 현상에서 볼 수 있는 판재의 형태 및 이송장치의 구동을 위해서는 유연체 속성에 소성의 성질을 부여하여 Elastic Analysis 가 아닌 Plastic Analysis 를 수행할 필요가 대두하게 됩니다.

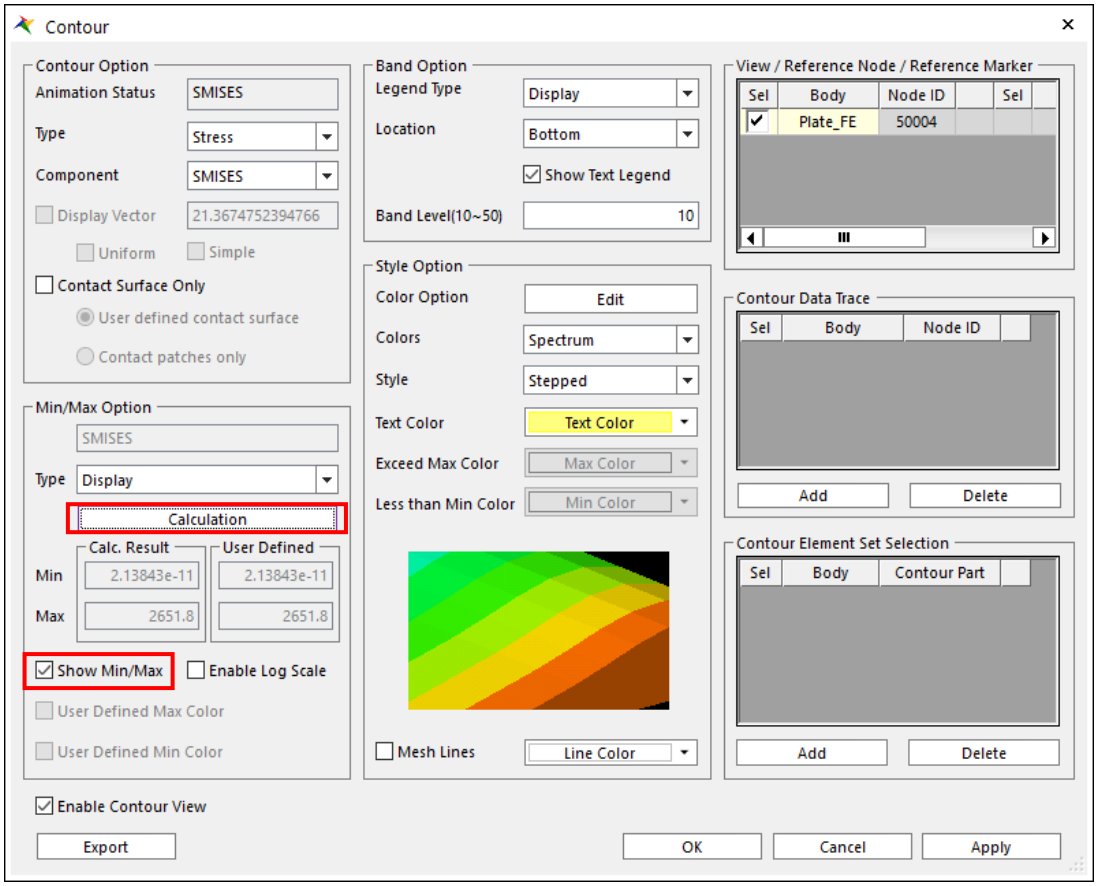
Contour 결과 확인하기**:**

1. **Flexible** 탭의 **FFlex** 그룹에서 **Contour Icon** 을 선택합니다.

   Contour Dialog 가 나타납니다.

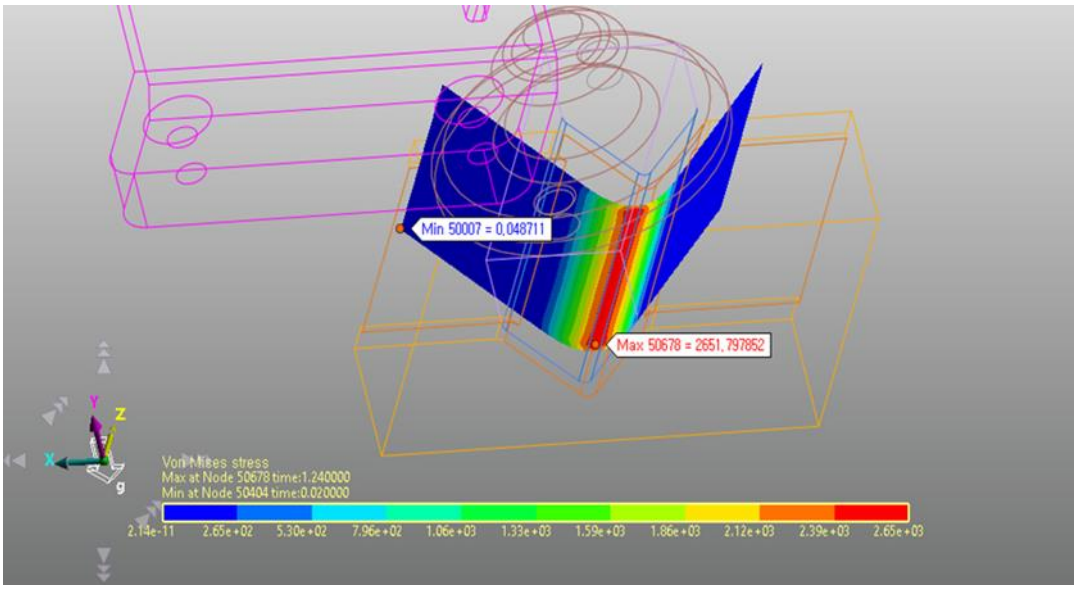
2. **Contour Dialog Box** 에서 다음과 같이 변경합니다.

   - Dialog 중간에 위치한 **Calculation** 버튼을 누릅니다
   - "**Show Min/Max**"를 체크합니다.
   - **OK** 버튼을 눌러 결과를 확인합니다.



3. **Analysis** 탭의 **Animation Control** 그룹에서 **Play** 버튼을 누릅니다.

   - 아래 그림과 같이, Plate_FE 에 대한 Contour 결과를 보다 자세히 확인하기 위해서, **Toolbar** 에서 **Wireframe** 아이콘을 누른 후, Animation 을 실행시킵니다.
   - **1.24** 초에서 Maximum Von-Mises Stress 결과가 약 **2650MPa** 이 도출됨을 확인할 수 있습니다.


Min 50007 = 0,048711
Max 50678 = 2651,797852
Y
Z
X
Von Mises stress
Max at Node 50678 time:1.240000
Min at Node 50404 time:0.020000
2.14e-11
2.65e+02
5.30e+02
7.96e+02
1.06e+03
1.33e+03
1.59e+03
1.86e+03
2.12e+03
2.39e+03
2.65e+03

Chapter

5

Plastic Analysis 수행하기

목적

본 장에서는 Elastic Analysis 를 수행한 후, 사용된 FFlex body 에 Plastic Material 을 적용하는 방법 및 해석을 수행 완료하고 결과를 확인하는 방법을 배우게 됩니다.

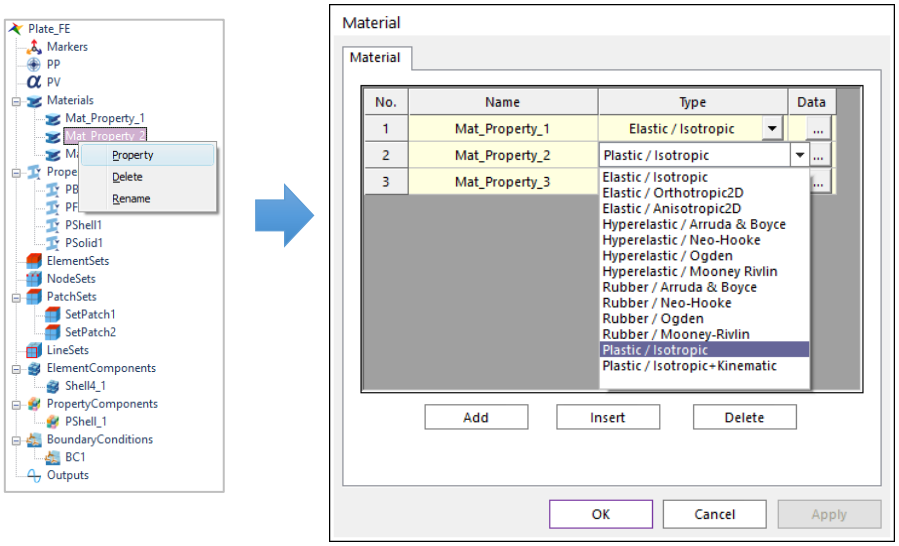
예상 소요 시간

20 분

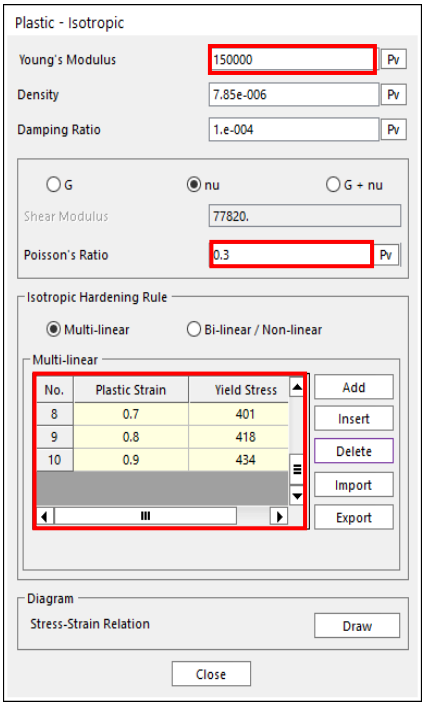
Plastic Modeling 수행하기 **(1)**

Plastic Material 생성하기**:**

1. **Plate_FE** 를 마우스로 더블 클릭하여, **Body Edit mode** 로 진입합니다.
2. Database 에서 아래 그림과 같이, **Material Property** Dialog Box 를 띄웁니다.



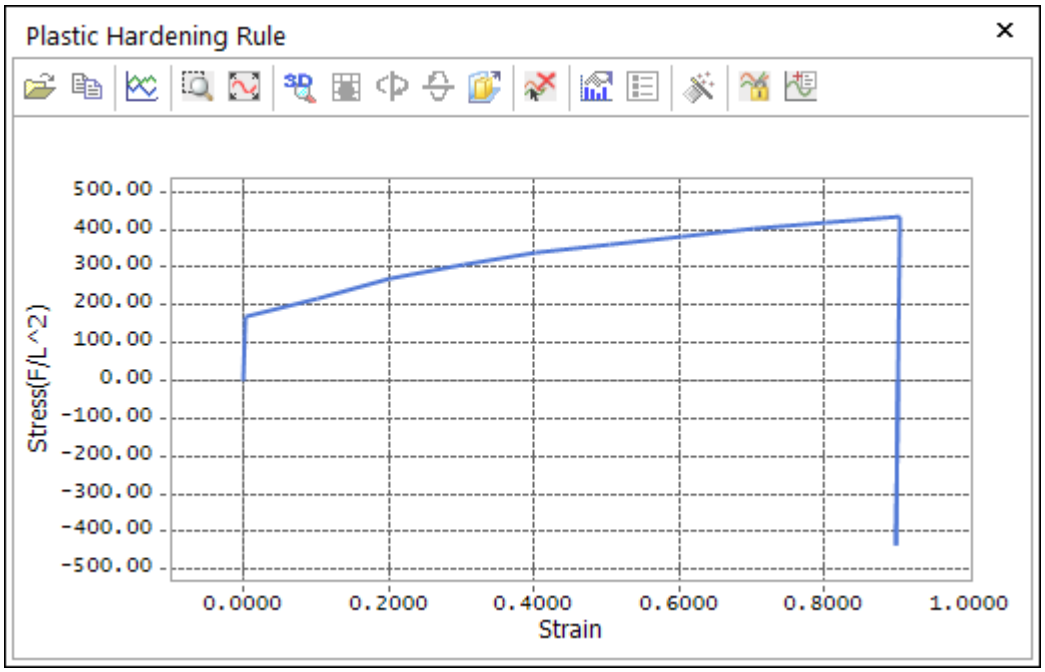
3. **Property** Dialog Box 에서 No.2 에 속한 **Mat_Property_2** 의 drop-down 메뉴에서 **Plastic / Isotropic** 을 선택하고, 오른쪽에 위치한 … 버튼을 눌러, **Plastic – Isotropic** Property Dialog Box 를 나타나게 합니다.
4. **Plastic – Isotropic** Dialog Box 에서 아래와 같이 설정을 변경합니다.



   - **Young's Modulus** 의 값을 200,000 에서 **150,000** 으로 변경합니다.
   - **Nu** 를 체크한 후, **Poisson's Ratio** 를 **0.3** 으로 변경합니다.
   - **Multi-linear** 에 표기된 **Plastic Strain** 과 **Yield Stress** 값을 **Add** 버튼을 눌러 새로운 행을 추가한 후, 아래의 표와 같이 입력합니다.

No.	Plastic Strain	Yield Stress
1	0	168
2	0.1	219
3	0.2	272
4	0.3	308
5	0.4	337
6	0.5	361
7	0.6	382
8	0.7	401
9	0.8	418
10	0.9	434

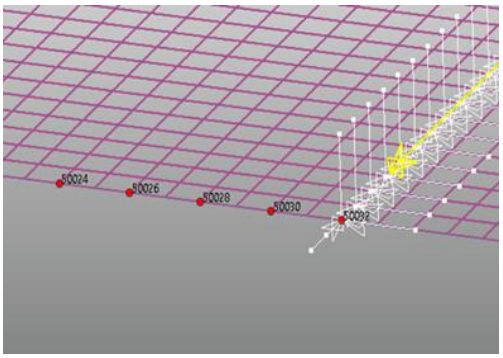
5. **Diagram** 영역에서 이전 단계에서 수행한 데이터 값이 제대로 설정되었는지 확인해 보기 위해 다이얼로그 맨아래의 **Stress-Strain Relation** 오른쪽에 위치한 **Draw** 버튼을 눌러 그래프가 아래의 그림과 같은지 확인합니다.

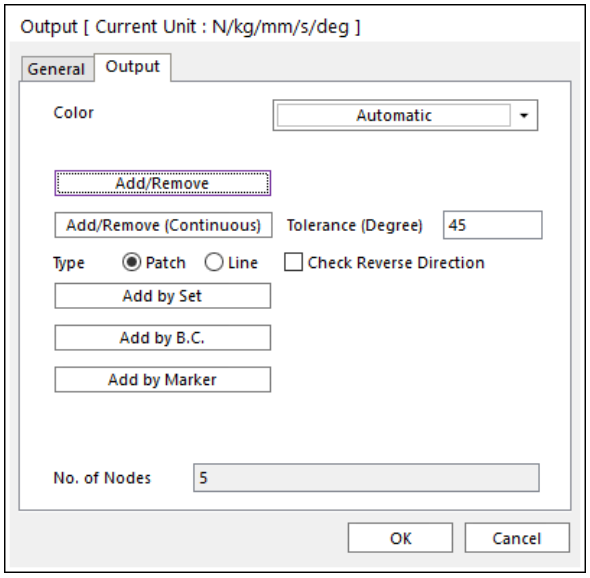


6. **FFlex Edit** 그룹에 **Output** 아이콘을 선택한 후, 나타나는 Dialog Box 에서 **Add/Remove** 버튼을 누릅니다.

- Keyboard 의 **Shift** key 를 누른 상태에서 아래 그림과 같이, 5 개의 node 를 마우스로 선택합니다.
- 노드들의 선택이 완료되면, 마우스 오른쪽 버튼을 눌러 나타나는 Pop-up Menu 에서 **Finish Operation** 을 선택합니다

7. **Outputs** Dialog 에서 **OK** 버튼을 누릅니다.





8. Output1 이 생성되었음 확인한 뒤, **FFlex Edit** 탭의 **Exit** 그룹에서 **Exit Icon** 을 눌러 상위 모드로 되돌아옵니다.

9. **File** 메뉴에서, **Save As** 를 클릭한 다음, **Plasticity_Bending_Machine_Isotropic.rdyn** 으로 저장합니다.

Plastic Analysis 수행하기 **(1)**

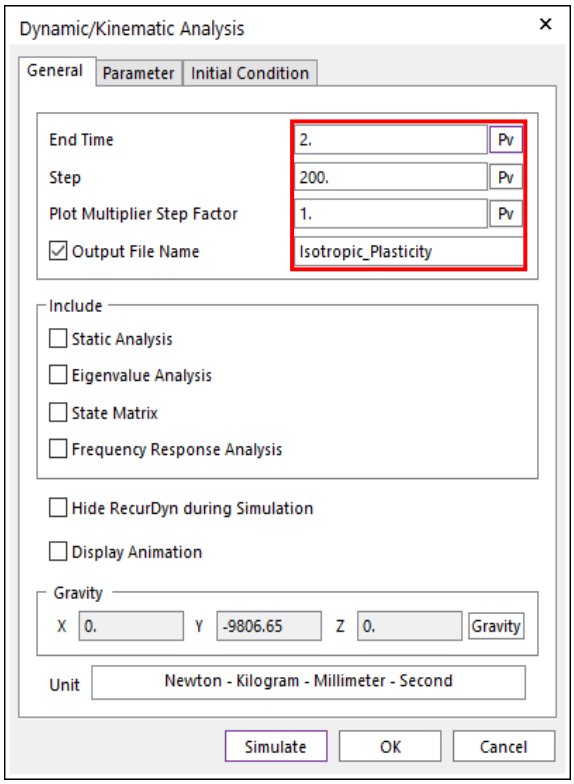
이전 과정을 통해서 생성된 Plastic Material 이 적용된 Plastic Analysis 결과를 확인하기 위해서 다음과 같이 시뮬레이션을 실행합니다.

시뮬레이션 실행하기**:**

1. **Analysis** 탭의 **Simulation Type** 그룹에서, **Dyn/Kin** 를 선택합니다.

   Dynamic/Kinematic Analysis 대화상자가 나타납니다.

2. 다음과 같이 **End Time** 과 **Step** 의 수를 정의합니다.
   - **End Time**: 2
   - **Step**: 200
   - **Plot Multiplier Step Factor**: 1
   - **Output File Name**: Isotropic_Plasticity
3. **Simulate** 를 클릭합니다.

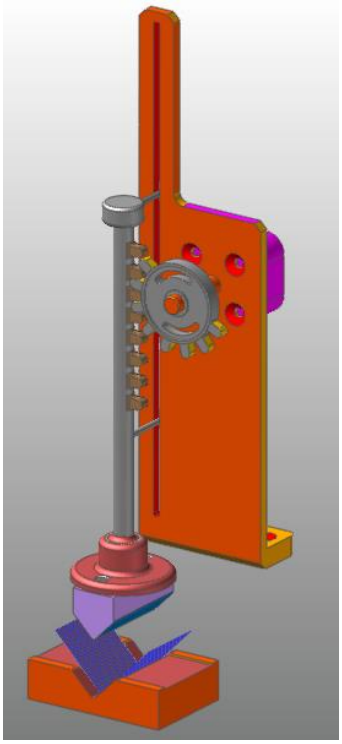


결과 보기**:**

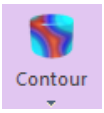
Analysis 탭의 **Animation Control** 그룹에서 **Play** 버튼을 누릅니다.

Elastic Analysis 결과와 달리, Plastic Analysis 결과에서는 자유낙하로 하강하는 펀치(Punch)에 의해 소성재질이 부여된 판재는 다이(Die)의 V 자 모양을 유지한 채 변형된 형태를 유지함을 확인할 수 있습니다.

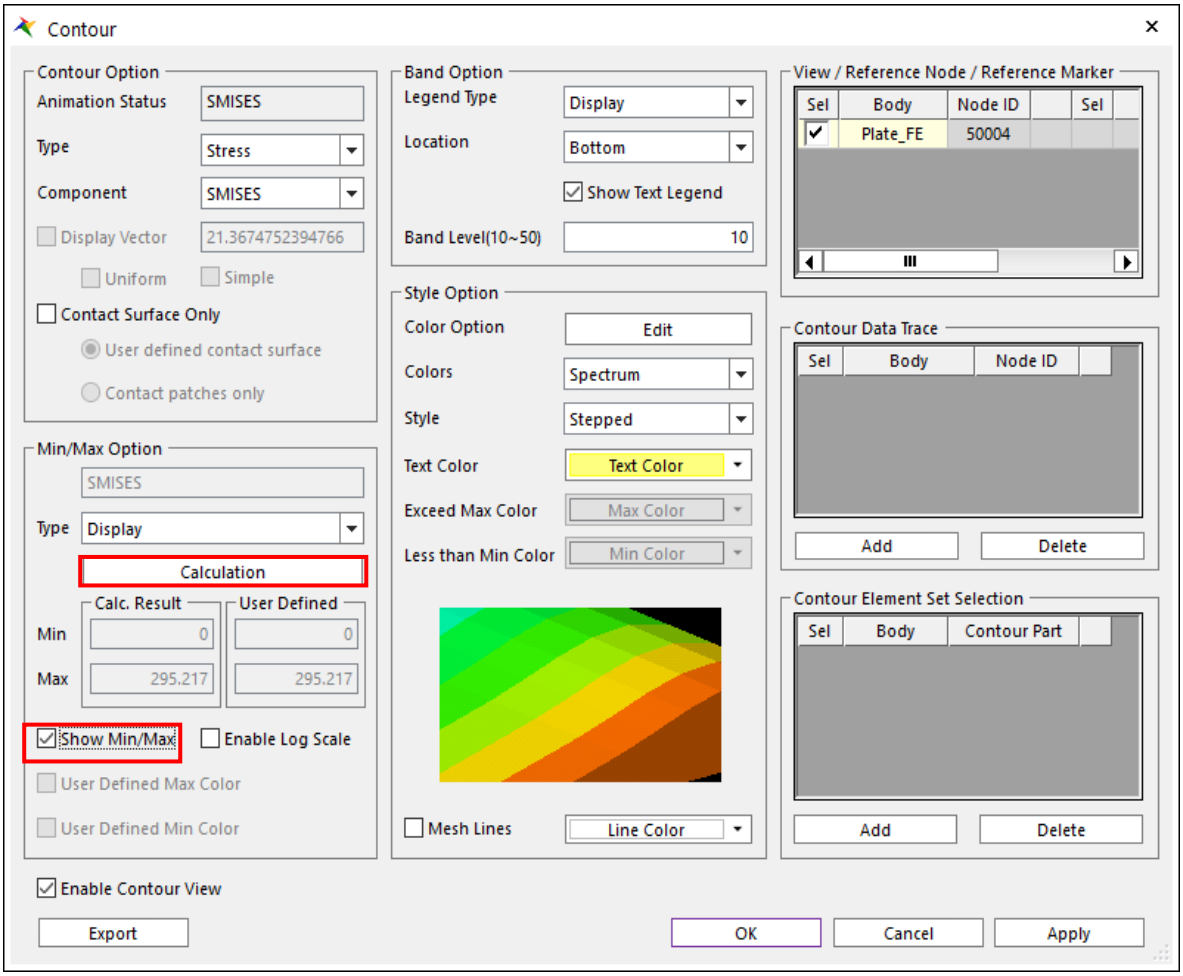
또한 Elastic Analysis 에서 나타난 탄성에 의한 반발력이 제거되었으므로 이송장치(Transfer Device)가 크게 튀어 오르는 현상 역시 사라졌습니다. 이로 인해 일정시간 이후 이송장치는 기어(Gear)의 맞물림으로 인해 다시 상승하는 메커니즘이 정상적으로 동작하여, 펀치의 다음 차례 자유낙하를 준비하게 됩니다.



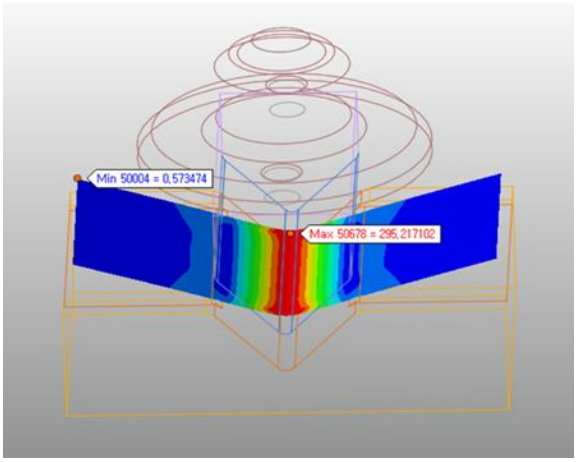
Contour 결과 확인하기**:**

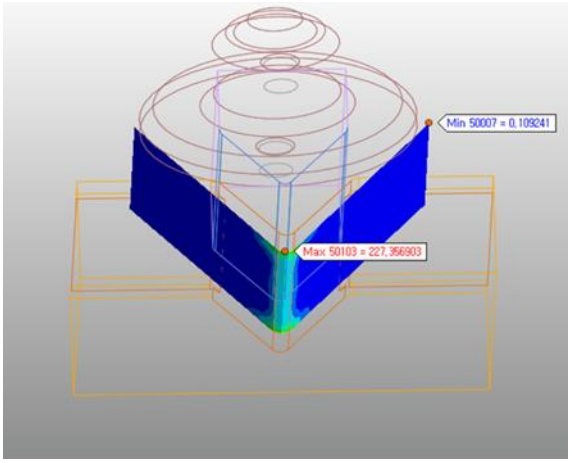


1. **Flexible** 탭의 **FFlex** 그룹에서 **Contour Icon** 을 선택하여 **Contour** Dialog 를 띄웁니다.
2. **Contour Dialog Box** 에서 다음과 같이 변경합니다.
   - Dialog 중간에 위치한 **Calculation** 버튼을 누릅니다
   - "**Show Min/Max**"를 체크합니다.
   - **OK** 버튼을 눌러 결과를 확인합니다.



3. **Analysis** 탭의 **Animation Control** 그룹에서 **Play** 버튼을 누릅니다.
   - 아래 그림과 같이, **Plate_FE** 에 대한 **Contour** 결과를 보다 자세히 확인하기 위해서, **Toolbar** 에서 **Wireframe** 아이콘을 누른 후, Animation 을 실행시킵니다.
   - **1.23** 초에서 Maximum Von-Mises Stress 이 약 **295.20MPa** 이고 **1.52** 초 이후에는 약 **227.35MPa** 의 잔류응력 (residual stress)이 지속적으로 나타남을 확인할 수 있습니다.

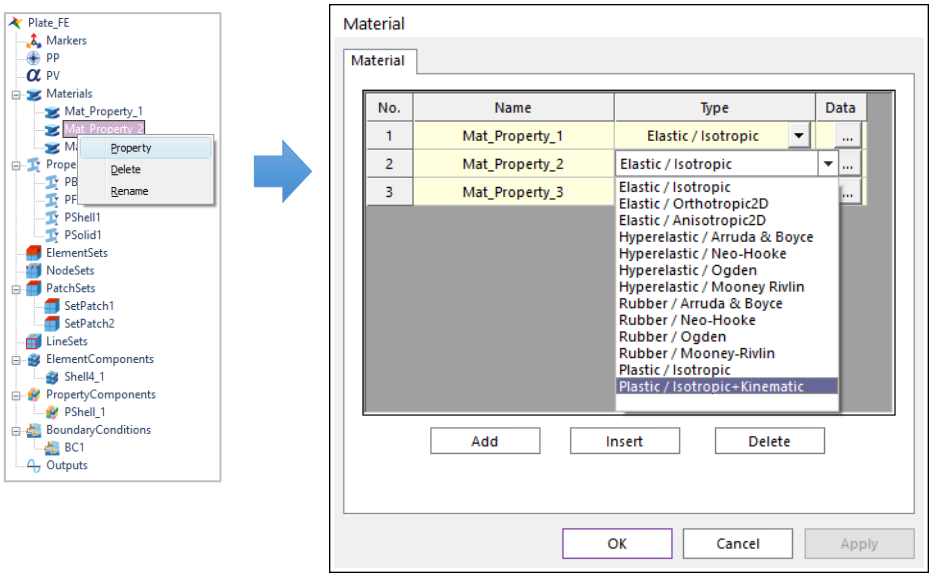

Min 50004 = 0,573474
Max 50678 = 295,217102


Min 50007 = 0,109241
Max 50103 = 227,356903

Plastic Modeling 수행하기 **(2)**

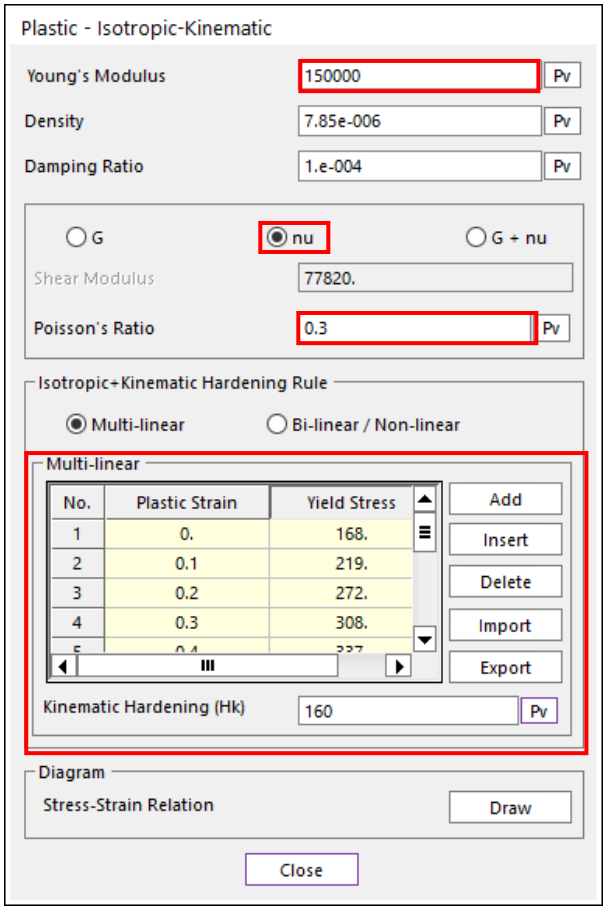
Plastic Material 생성하기**:**

1. **Plate_FE** 를 마우스로 더블 클릭하여, **Body Edit mode** 로 진입합니다.
2. **Database** 에서 아래 그림과 같이, **Material Property** Dialog Box 를 띄웁니다.



3. **Property** Dialog Box 에서 No.2 에 속한 **Mat_Property_2** 의 drop-down 메뉴에서 **Plastic / Isotropic + Kinematic** 을 선택하고, 오른쪽에 위치한 **...** 버튼을 누른 후, **Plastic – Isotropic-Kinematic** Property Dialog Box 를 나타나게 합니다.

4. Plastic – Isotropic-Kinematic Dialog Box 에서 아래와 같이 설정을 변경합니다. (Young's Modulus 와 Nu 의 경우, Plastic Modeling 수행하기 (1)을 진행했다면 변경할 필요가 없습니다.)



   - **Young's Modulus** 의 값을 200,000 에서 **150,000** 으로 변경합니다.
   - **Nu** 를 체크한 후, **Poisson's Ratio** 를 **0.3** 으로 변경합니다.
   - **Multi-linear** 에 표기된 **Plastic Strain** 과 Yield Stress 값을 **Add** 버튼을 눌러 새로운 행을 추가한 후,

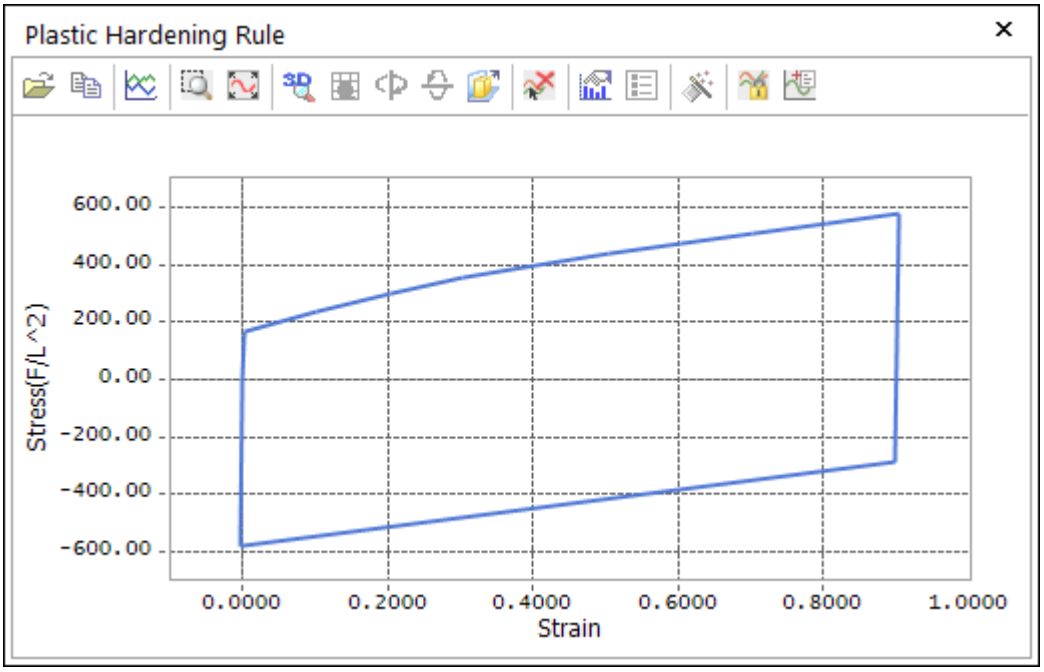
No.	Plastic Strain	Yield Stress
1	0	168
2	0.1	219
3	0.2	272
4	0.3	308
5	0.4	337
6	0.5	361
7	0.6	382
8	0.7	401
9	0.8	418
10	0.9	434

   아래의 표와 같이 입력합니다.

   - **Kinematic Hardening (Hk)** 에 **160** 을 입력합니다.

5. **Diagram** 영역에서 이전 단계에서 수행한 데이터 값이 제대로 설정되었는지 확인해 보기 위해 **Stress-Strain Relation** 오른쪽에 위치한 **Draw** 버튼을 누릅니다. 생성된 그래프가 아래의

그림과 같은 지 확인합니다.



6. **FFlex Edit** 탭의 **Exit** 그룹에서 **Exit Icon** 을 눌러 상위 모드로 되돌아옵니다.
7. **File** 메뉴에서, **Save As** 를 클릭한 다음,

   Plasticity_Bending_Machine_Isotropic_Kinematic.rdyn 으로 저장합니다.

Plastic Analysis 수행하기 **(2)**

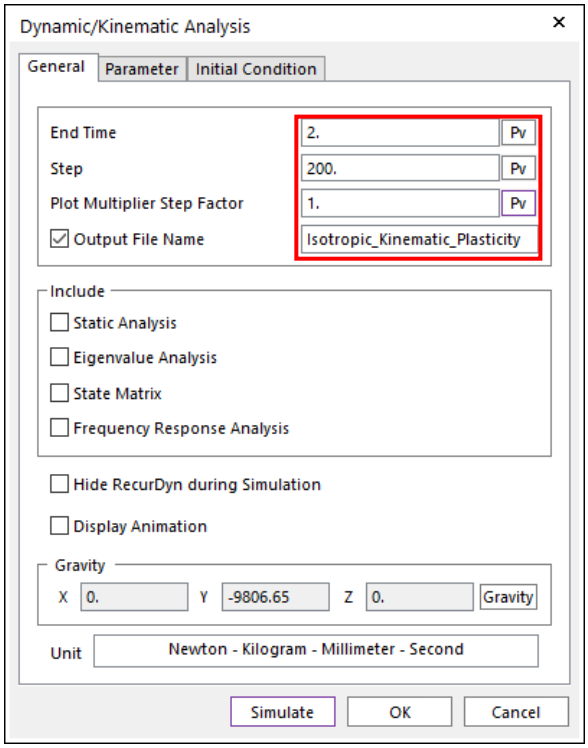
이전 과정을 통해서 수정된 Plastic Material 이 적용된 Plastic Analysis 결과를 확인하기 위해서 다음과 같이 시뮬레이션을 실행합니다.

시뮬레이션 실행하기**:**

1. **Analysis** 탭의 **Simulation Type** 그룹에서, **Dyn/Kin** 를 선택합니다.

   Dynamic/Kinematic Analysis 대화상자가 나타납니다.

2. 다음과 같이 **End Time** 과 **Step** 의 수를 정의합니다.
   - **End Time**: 2
   - **Step**: 200
   - **Plot Multiplier Step Factor**: 1
   - **Output File Name**: Isotropic_Kinematic_Plasticity
3. **Simulate** 를 클릭합니다.

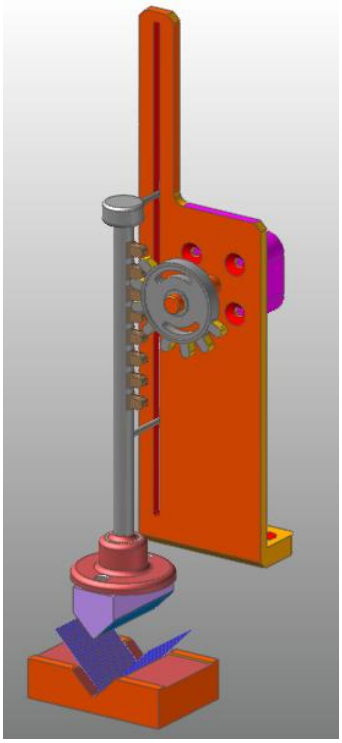


결과 보기**:**

Analysis 탭의 **Animation Control** 그룹에서 **Play** 버튼을 누릅니다.

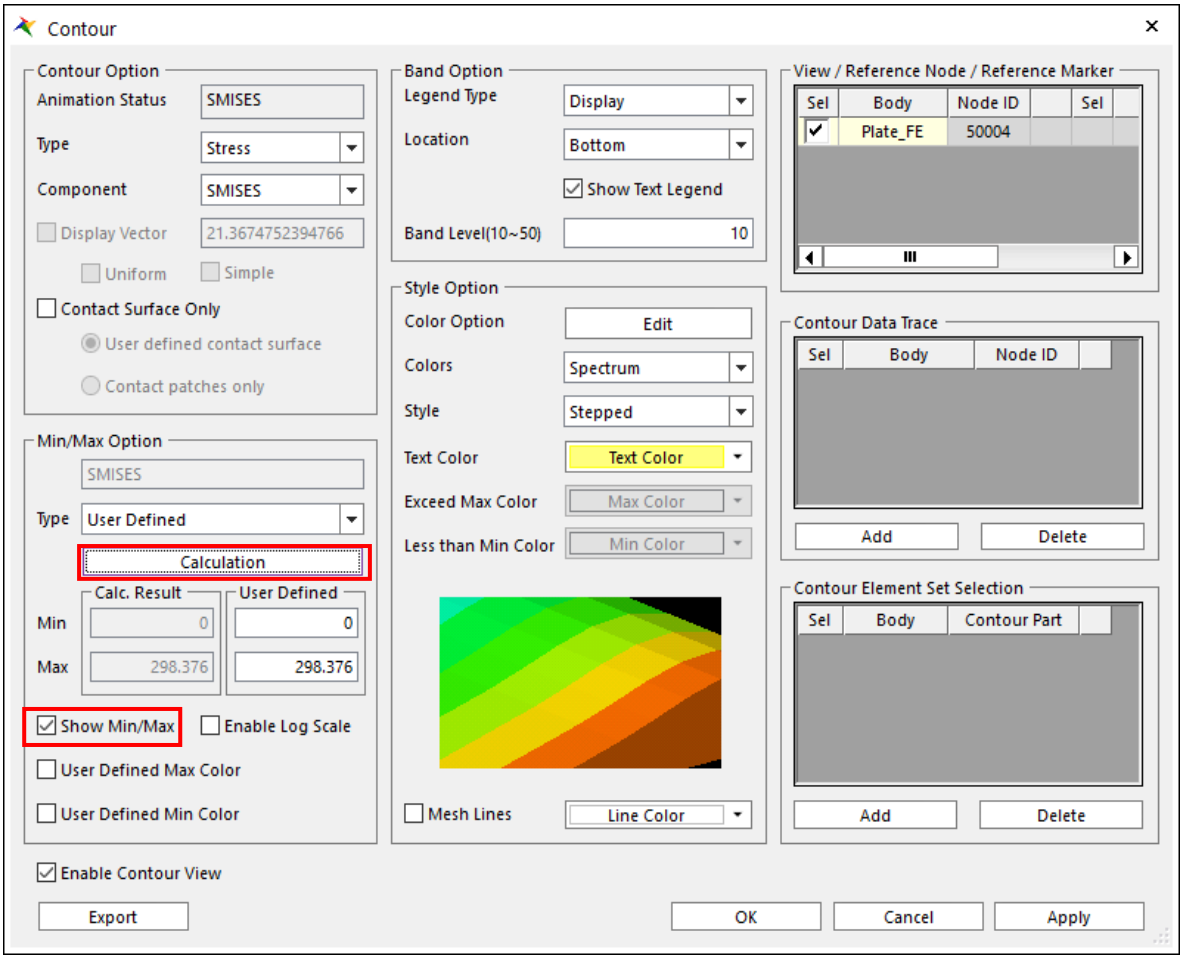
Plastic Analysis 수행하기 (1)의 결과와 마찬가지로, 자유낙하로 하강하는 펀치(Punch)에 의해 소성재질이 부여된 판재는 다이(Die)의 V 자 모양을 유지한 채 변형된 형체를 유지함을 확인할 수 있습니다.

또한, 일정시간 이후 이송장치는 기어(Gear)의 맞물림으로 인해 다시 상승하는 메커니즘을 통해, 펀치의 다음 차례 자유낙하를 준비하게 됩니다.



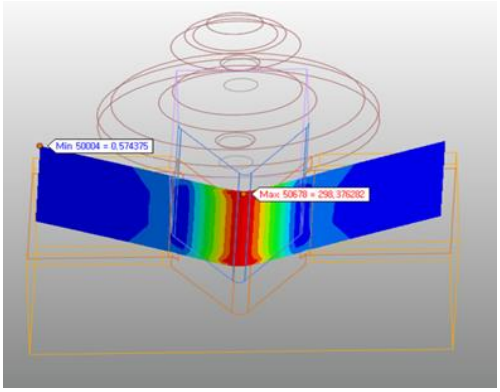
Contour 결과 확인하기**:**

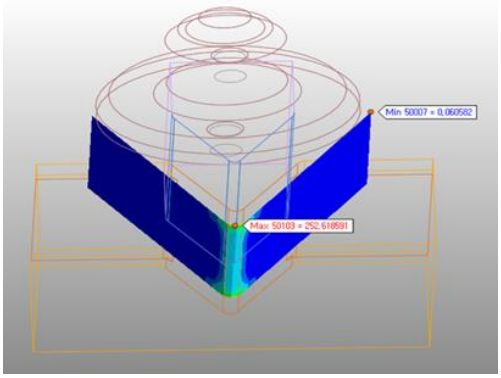
1. **Flexible** 탭의 **FFlex** 그룹에서 **Contour Icon** 을 선택하여 **Contour** Dialog 를 띄웁니다.
2. **Contour Dialog Box** 에서 다음과 같이 변경합니다.
   - Dialog 중간에 위치한 **Calculation** 버튼을 누릅니다
   - "**Show Min/Max**"를 체크합니다.
   - **OK** 버튼을 눌러 결과를 확인합니다.



3. **Analysis** 탭의 **Animation Control** 그룹에서 **Play** 버튼을 누릅니다.
   - 아래 그림과 같이, **Plate_FE** 에 대한 **Contour** 결과를 보다 자세히 확인하기 위해서, **Toolbar** 에서 **Wireframe** 아이콘을 누른 후, **Animation** 을 실행시킵니다.

- **1.23** 초에서 Maximum Von-Mises Stress 가 약 **298.36MPa** 이고, **1.53** 초 이후에는 약 **252.03MPa** 의 잔류응력이 지속적으로 나타남을 확인할 수 있습니다.





Chapter 6

결과 분석 및 검토

목적

본 장에서는 두 종류의 Plastic Material 을 적용한 Plastic Analysis 결과를 분석하고, Elastic Analysis 와의 차이점에 대해서도 살펴봅니다.

예상 소요 시간

10 분

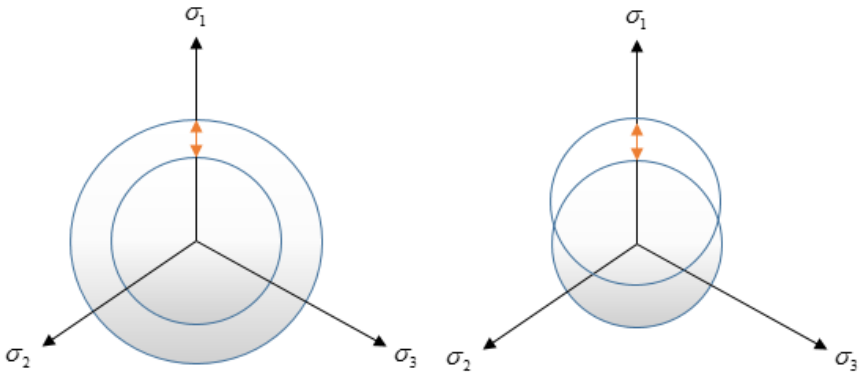
Plastic Analysis 결과 분석하기

Metal Plasticity 에 대한 이론적 설명**:**

이전 단계에서 유연체로 모델링된 판재는 펀치로부터 하중을 받아 영구 변형, 즉 소성변형(Plastic deformation)을 일으키게 되는데, 이때, 발생되는 응력(Stress) 크기를 항복응력(Yield Stress)이라고 합니다. 응력에 대한 표현방법은 3 차원 공간 상에서 X, Y, Z 축을 설정한 뒤, 구 혹은 다각형 형태의 3 차원 모양으로 나타낼 수 있는데, 3 차원 형상의 표면 혹은 곡면을 항복곡면(Yield Surface)이라고 합니다.

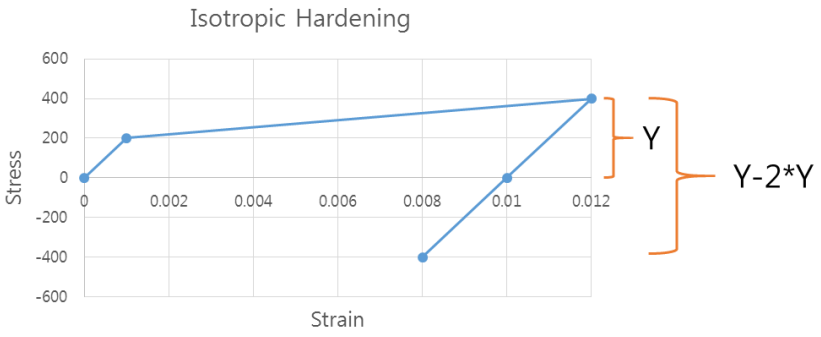
실제 금속판을 구성하는 연성재료의 특성은 탄성영역을 지나 소성영역으로 이동한 상태에서 하중을 해제하고 다시 하중을 가하게 되면 재료의 항복응력이 재료의 변형과 더불어 더 크게 증가하는 현상이 발생하는데 이를 경화(Hardening)로 표현합니다. 따라서, 소성재질의 특성을 나타내는 대표적인 속성은 경화(Hardening)로 표현될 수 있으며, 경화는 크게 두 가지 방법으로 표현할 수 있습니다.

첫 번째는 항복곡면이 모든 방향으로 동일한 크기로 증가하는 등방성 경화(Isotropic Hardening)이고, 두 번째는 항복곡면의 크기는 동일하게 유지한 채, 곡면의 중심이 이동하는 이동성

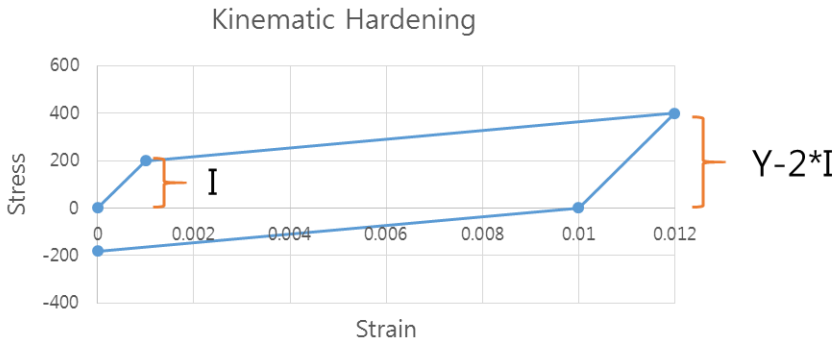


경화(Kinematic Hardening) 입니다.

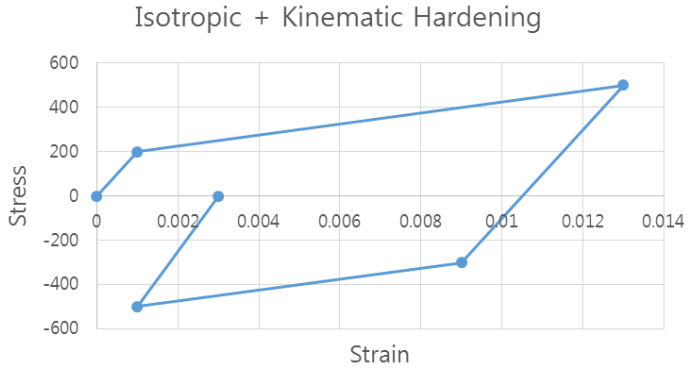
등방성 경화의 물리적인 특징은 소성영역에 진입한 상태의 항복응력 크기(+Y)가 인장하중을 제거하고 압축하중을 부여하면 항복응력 크기가 –Y (Y-2*Y)가 될 때까지 Stress-Strain 관계에서 선형의 특징을 나타내는 탄성거동(Elastic Behavior)를 나타내게 됩니다.



반면, 이동성 경화의 물리적 특징은 초기 항복응력 크기(I)를 지나 소성영역에 진입한 상태의 항복응력 크기(+Y)가 인장하중을 제거하고 압축하중을 부여하면 항복응력 크기가 Y-2*I 로 될 때까지 Stress-Strain 관계에서 선형의 특징을 나타내는 탄성거동(Elastic Behavior)를 나타내게 됩니다.



RecurDyn 에서 제공되는 방법은 Isotropic Hardening 방법과 Isotropic Hardening 과 Kinematic Hardening 결합한 Isotropic + Kinematic Hardening 방법 두 가지를 제공하고 있습니다.



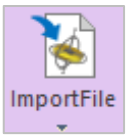
본 교재에서 사용된 절곡기(Bending Machine)의 경우, 다이(Die)의 자유낙하로 인해 금속판과 충돌을 일으켜 굽힘 현상이 발생하고 난 뒤, 외부로부터 또 다른 하중이 부여되는 상태가 아니므로 Isotropic Hardening 과 Kinematic Hardening 선정으로 인한 물리적 차이는 크게 나타나지 않습니다. 하지만 Kinematic Hardening (Hk) 값을 입력함으로써 경화계수(Hardening Modulus)의 변화가 발생하여 소성 영역의 기울기(Plastic Modulus)를 다르게 나타남에 따라 잔류응력 및 영구 변형률이 다르게 나타날 수 있습니다.

Plastic Analysis (1) (2) 결과 비교

Plot 결과 비교하기**:**

1. **Analysis** 탭의 **Plot** 그룹에서, **Result** 을 선택하여 Plot 모드로 진입합니다.

   Modeling 작업창에서 Plot 작업창으로 변경되어 나타납니다.



2. **Home** 탭에 포함된 **Import and Export** 그룹에서, **Import** 를 누릅니다.

   Import 대화상자에서 2 번의 Plastic Analysis 를 수행하여 생성된 ***.rplt file** 을 선택합니다.

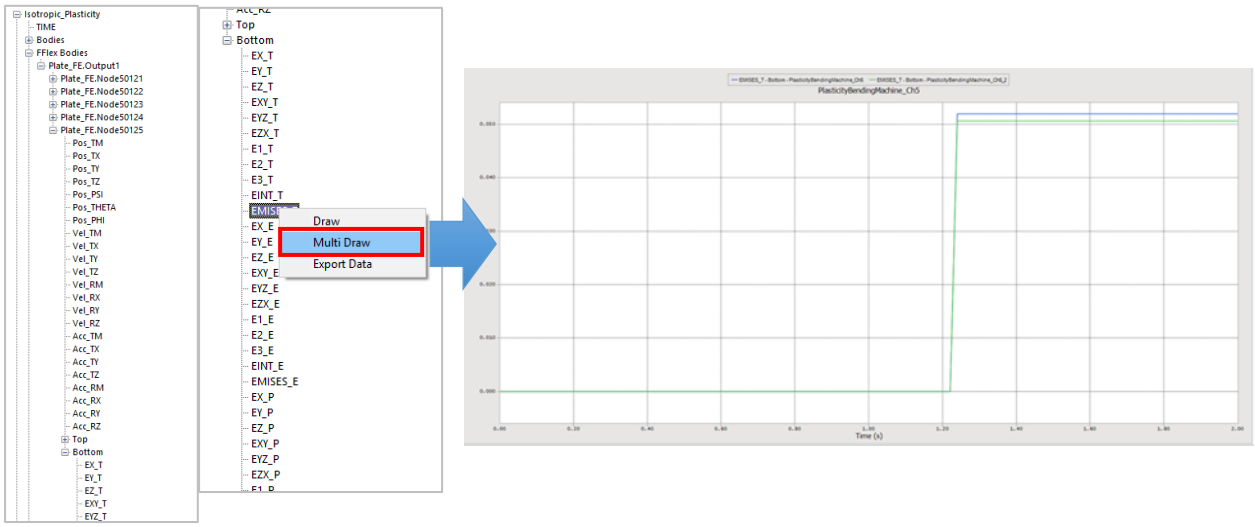
- 첫 번째 해석에서 생성된 Output Folder 에서 **Isotropic_Plasticity.rplt** 를 선택합니다.
- 다시 Import 아이콘을 누른 후, 두 번째 simulation 후, 생성된 Output Folder 에서 **Isotropic_Kinematic_Plasticity.rplt** 를 선택합니다. (만일 Isotropic+Kinematic 해석을 마친 상태에서 곧바로 Plot 모드로 진입했다면 이 파일은 자동으로 Import 되어 있습니다.)

3. 아래 그림과 같이, **Database** 에서 불러들인 두 개의 rplt file 정보가 존재함을 확인할 수 있습니다.

- Isotropic_Plasticity 오른쪽에 위치한 + 버튼을 누릅니다. 새롭게 나타난 Tree 구조에서 **FFlex_Bodies-Plate_FE.Output1-Plate_FE_Node50032, Shell-Bottom** 이름 왼쪽에 위치한 + 버튼을 연속해서 누른 후, 최종적으로 EMISES_T 를 선택합니다.
- 마우스 오른쪽 버튼을 누르면 나타나는 Pop-up 메뉴에서 **Multi Draw** 를 선택합니다.

4. 상기 그림과 같이 Plot 작업창에 두 개의 그래프가 나타남을 확인할 수 있습니다.

5. 3 번의 과정에서 **EMISES_T** 대신 **SMISES** 를 선택한 뒤, **Multi Draw** 를 선택하면 오른쪽 그림과 같은 결과를 얻을 수 있습니다.



결과 분석하기

위에서 그려본 결과 그래프는 다음과 같은 의미를 가집니다.

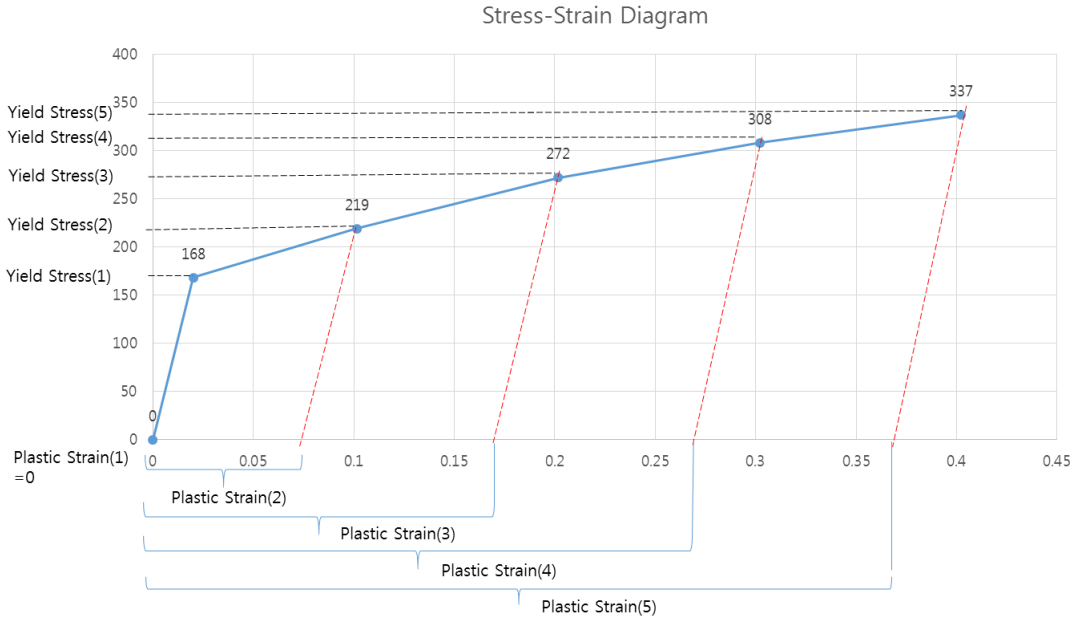
Total Strain 의 결과는 Plastic Strain 과 Elastic Strain 이 반영되어 금속 판재의 영구 변형률을 초래하게 됩니다. 그리고 소성 재질로서 Isometric Hardening 과 Isometric + Kinematic Hardening 을 각각 적용하였을 때, 동일한 다중선형 모델(Multi-Linear Model)을 사용하였음에도 불구하고 그 결과가 다르게 나타남을 확인할 수 있습니다. 이는 앞서 이론적 설명 부분에서 언급한 소성영역의 기울기가 달라지기 때문입니다.

Von-Mises 결과에서 확인한 바와 같이, 금속 판재는 외부 충격으로 인한 변형이 발생된 이후에는 일정한 크기의 응력, 즉 잔류응력이 존재하게 됩니다.

참고 설명

다중선형 모델 **(Multi-Linear Model)**

소성영역에서 사용되는 Stress-Strain 관계는 특정 수식으로 표현할 수 있으나, 본 튜토리얼에서는 여러 선형의 데이터를 입력하여 이를 바탕으로 소성계수(Plastic Modulus)를 구하는 다중선형 모델(Multi-Linear Model)을 사용하였습니다. 이와 같은 방법은 일반 부재의 Plastic Strain vs. Yield



Stress 에 대한 실험데이터를 추출하여 그 결과를 입력함으로써, 다중선형 모델을 생성할 수 있습니다.

상기 그림과 같이, 실험을 통하여 얻은 Plastic Strain(x), Yield Stress(y)에 해당되는 값을 얻은 후, 앞 절에서 설명한 **Plastic – Isotropic Dialog Box** 의 **Multi-linear** 에 각각의 값을 입력하면 Stress-Strain Diagram 이 파란색 선으로 생성되게 됩니다. 이때, 주의해야 할 점은 Stress-Strain Diagram 에서 소성영역의 Strain 은 Total Strain 즉, Plastic Strain 과 Elastic Strain 이 포함된 결과이므로, 데이터 입력 시, Plastic Strain 결과만 입력해야 합니다. 실제 실험으로 Plastic Strain 값을 얻는 방법은 항복응력 이상이 하중을 가한 후, 힘을 제거하여 최종 변형된 시편의 변형량을 측정함으로써 Plastic Strain 을 얻을 수 있습니다.

Thanks for participating in this tutorial!