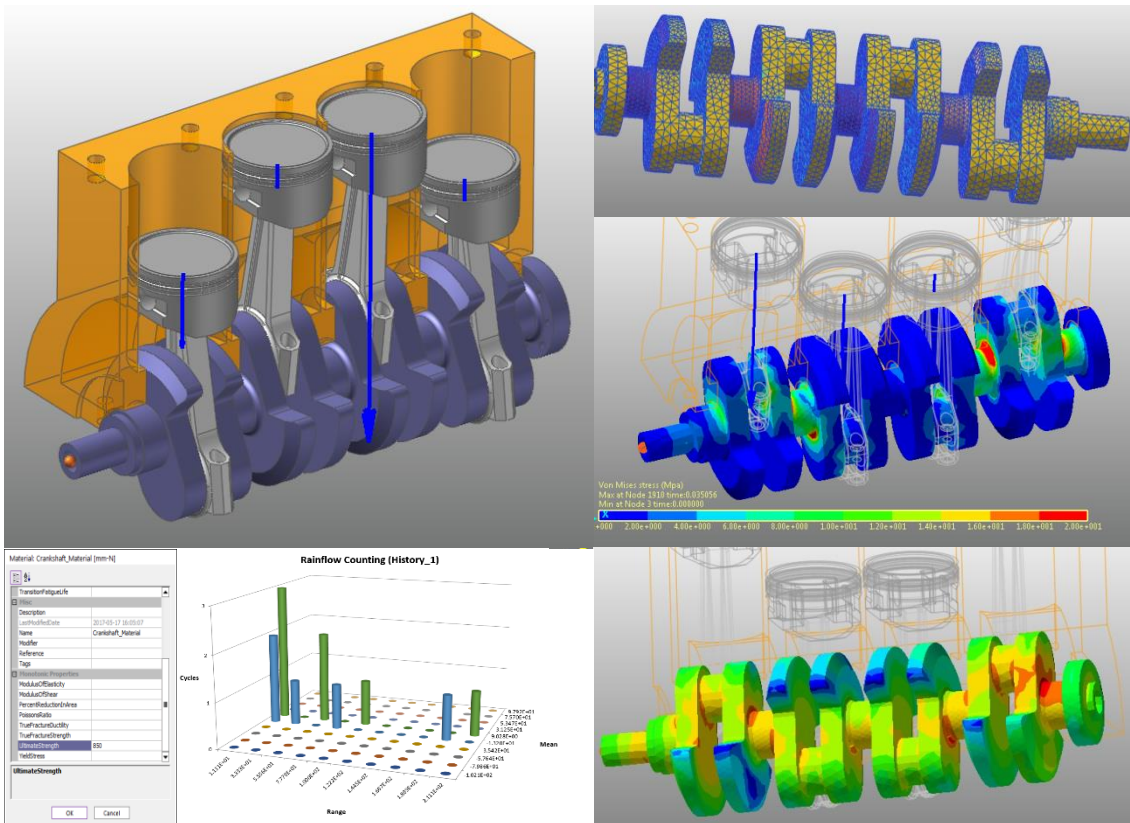


# RFlex Crankshaft Tutorial (Durability)



**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
Rdyn 모델 불러들이기 .....	7
초기 4 기통 엔진 모델 시뮬레이션 실행 .....	8
RFlex Body 생성하기 .....	10
목적 .....	10
예상 소요 시간 .....	10
RFlex Body 생성하기 .....	11
RFlex Body 가 포함된 Dynamic 해석 및 결과 확인 .....	14
Durability Analysis 수행하기 .....	21
목적 .....	21
예상 소요 시간 .....	21
Durability Analysis 수행하기 .....	22
결과 분석 및 검토 .....	37
목적 .....	37
예상 소요 시간 .....	37
Safety Factor 결과 분석하기 .....	38

## Chapter

## 1

## 개요

피로 혹은 내구해석(Durability Analysis)을 수행하는 목적은 관심이 있는 부재 즉, RecurDyn 에서 모델링된 Flexible Body 에 대해서 다양한 동적 하중으로부터 어느 시점까지 flexible body 의 특정 부위가 안정적으로 버틸 수 있는지 혹은 얼마나 안정한지를 판단하는 것입니다. 그러므로 단순히 최대 응력 및 최대 변형률에 대한 결과만을 고려하는 것과는 구분됩니다.

RecurDyn 은 Body 의 flexibility 를 고려하기 위해서 다물체 동역학 모델을 구성함에 있어 Rflex 또는 FFlex Body 를 포함시킬 수 있도록 지원하고 있습니다. 따라서 RecurDyn/Durability 모듈도 FFlex Body 뿐만 아니라 RFlex Body 에 대해서도 적용 가능합니다.

그러므로 본 교재에서는 RFlex Body 를 사용하여 피로해석을 수행한 뒤, 원하는 피로해석 결과를 얻는 방법 및 절차에 대해서 배우도록 합니다.

본 교재에서 사용된 모델은 단순화된 4 기통 직렬형 내연기관 모델로써, 크랭크 축(Crankshaft) Body 를 RFlex Body 로 대체한 후, 4 개의 피스톤에서 발생한 연소 폭발 과정을 동적 하중으로 부여하여, Crankshaft 설계의 안정성을 내구해석을 통해 판단하고자 합니다.

## 목적

본 교재에서 다루고자 하는 내용은 다음과 같습니다.

- RecurDyn/RFLEX 를 통한 Flexible Body 교체 방법
- RecurDyn/RFLEX 를 통한 응력 확인 방법
- 내구해석을 수행하기 위한 필요조건
- 내구해석 해석방법 및 결과를 얻는 방법
- 내구해석 결과에 대한 분석 방법

## 필요 요건

본 교재는 RecurDyn 에서 제공되고 있는 Basic Tutorial 및 FFlex/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

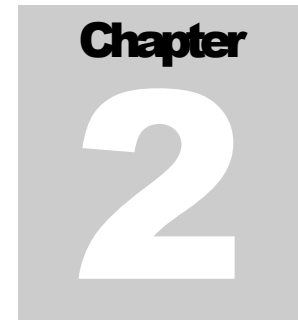
본 교재는 다음과 같은 순서로 구성되어 있으며, 수행 예상 시간은 다음과 같습니다.

과정	시간(분)
Rdyn모델을 불러들이기	10
RFlex body 교체하기	15
Fatigue 결과 확인을 위한 Patch Set 생성하기	5
Fatigue Evaluation 실행하기	25
Fatigue 결과 확인하기	10
총합	65



## 예상 소요 시간

본 교재를 수행하는 시간은 약 65 분 정도 소요될 예정입니다.



## 초기 모델 불러오기

### 목적

초기 모델을 열어 시뮬레이션을 실행하고, 4기통 엔진 모델 동작을 관찰해 봅시다.



예상 소요 시간

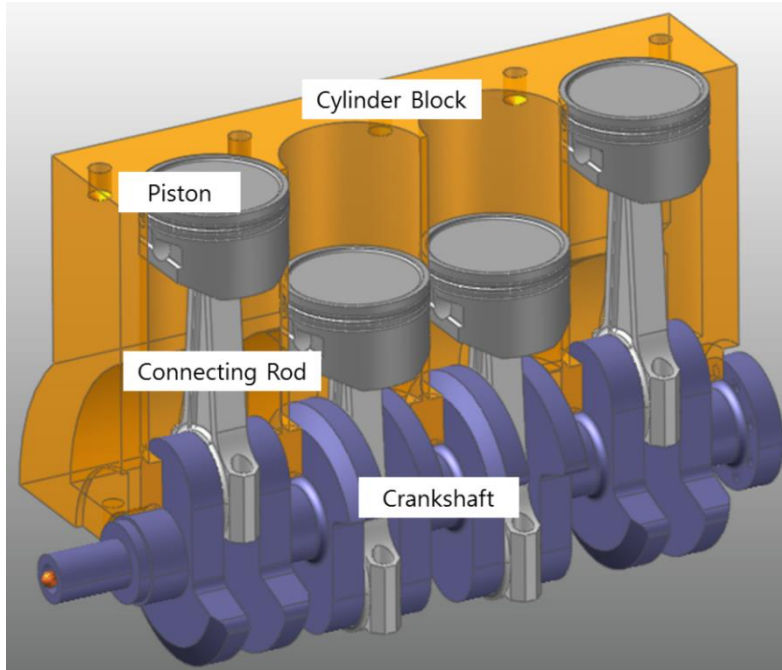
10 분

## Rdyn 모델 불러들이기

**RecurDyn 실행 및 초기 모델 불러오기:**



1. 바탕화면에서 **RecurDyn** 아이콘을 더블 클릭하면, **RecurDyn** 이 실행되면서 **Start RecurDyn** 다이얼로그 박스가 나타납니다.
2. **Start RecurDyn** 다이얼로그 박스가 나타나면 닫아줍니다.
3. **File** 메뉴에서 **Open** 을 클릭합니다.
4. **Durability** 튜토리얼 경로에서 **RD\_Durability\_4Cyl\_Engine\_Start.rdyn** 을 선택합니다.  
(파일 경로: <Install Dir> \Help \Tutorial \Durability \RFlexCrankshaft).
5. **Open** 을 클릭합니다. 아래의 그림처럼 모델이 보여집니다.



모델의 구성은 다음과 같습니다.

위의 그림은 4기통 직렬형 엔진 모델을 나타내고 있으며, 실린더 블록(Cylinder Block), 피스톤(Piston), 커넥팅 로드(Connecting Rod), 크랭크 축(Crankshaft) 등으로 크게 구성되어 있습니다. 실제 내연기관에서 발생하는 가스 폭발력은 4개의 Piston 이 Cylinder Block 안에서 수직 방향으로 구동하게 만들고, 이는 Connecting Rod 를 통해 Crankshaft 를 회전시킵니다. 따라서, 이와 같은 과정을 RecurDyn 에서 모사하기 위해 4개의 Piston 에서 발생하는 가스 폭발력을 시간에 대한 Force Profile 로 변환하여 직접 Piston Body 에 가진 힘으로 부여하도록 합니다.

**모델 저장하기:**

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

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

## 초기 4기통 엔진 모델 시뮬레이션 실행

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

초기 시뮬레이션 실행하기:

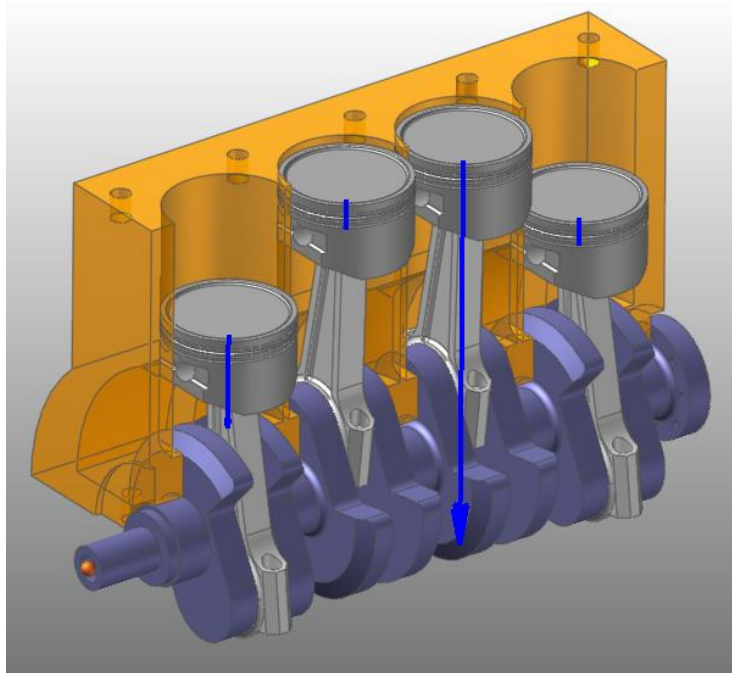


1. **Analysis** 탭의 **Simulation Type** 그룹에서, **Dyn/Kin** 를 선택합니다.
2. **Dynamic/Kinematic Analysis** 대화상자가 나타납니다.
3. 설정된 상태를 확인한 뒤, **Simulation** 버튼을 클릭합니다.

결과보기:

- ▶ **Analysis** 탭의 **Animation Control** 그룹에서 **Play** 버튼을 눌러 아래 그림과 같이 4기통 엔진이 작동하는 것을 확인합니다.

이때, 모델링 작동에 대해서 보다 자세히 살펴보면, 4개의 Piston 에서 일어나는 가스 폭발은 Piston\_1 → Piston\_3 → Piston\_4 → Piston\_2 순으로 발생합니다. 이는 Animation 상에서 Force Display 를 나타내는 화살표의 크기로 확인할 수 있습니다. 각각의 Piston 에서는 일반적인 4 행정, 흡입→압축→폭발→배기 과정이 일어나지만, 본 교재에서 사용된 동역학 모델에 있어서는 폭발에



의해 발생하는 가스 폭발력만이 의미를 가지므로, 폭발력을 시간에 대한 Force Profile 로 생성하여 각각의 Piston 에 순차적으로 힘을 부여할 수 있도록 모델링 되었습니다.





## RFlex Body 생성하기

RecurDyn/Durability 는 강체(Rigid Body)가 아닌 유연체(Flexible Body)에 대해서 피로해석을 수행할 수 있습니다.

### 목적

본 장에서는 RecurDyn/RFlex 에서 제공하는 RFlex Body 를 사용하여 기존의 Rigid Body 를 Flexible Body 로 변경한 뒤, 피로해석을 적용하는 방법을 배워봅시다.

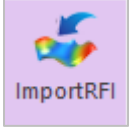


### 예상 소요 시간

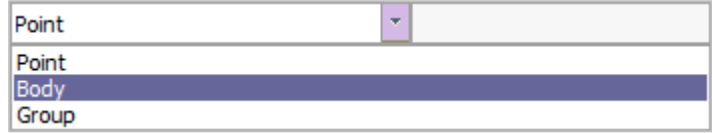
15 분

## RFlex Body 생성하기

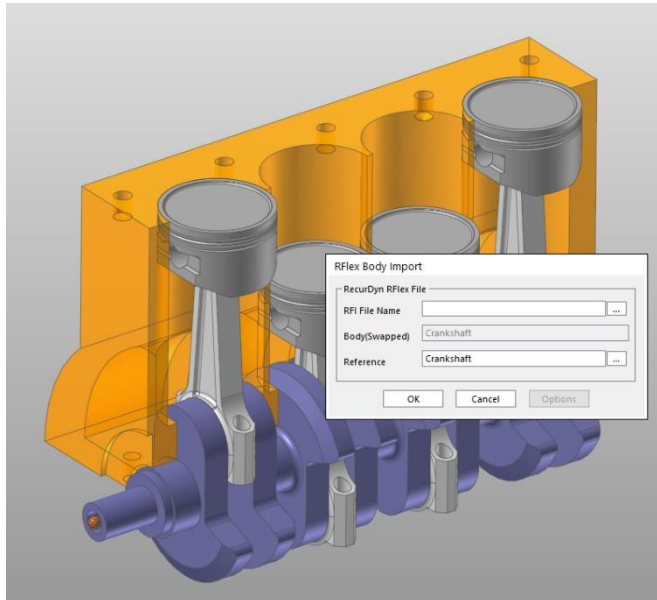
**RFlex Body** 생성하기:



1. **Flexible** 탭의 **RFlex** 그룹에서 **Import RFI** Icon 을 선택합니다.
2. 모델링 옵션에서 **Body** 로 변경합니다.

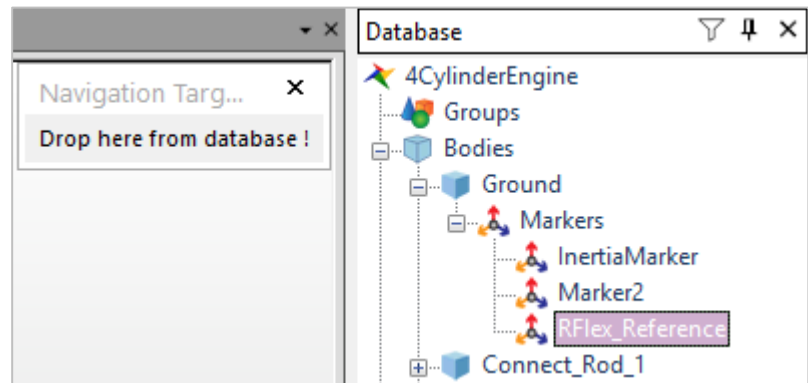


3. **Window** 창에서 아래 그림과 같이, **Crankshaft** 를 마우스로 선택합니다.
4. **RFlex Body Import** Dialog 가 나타납니다.

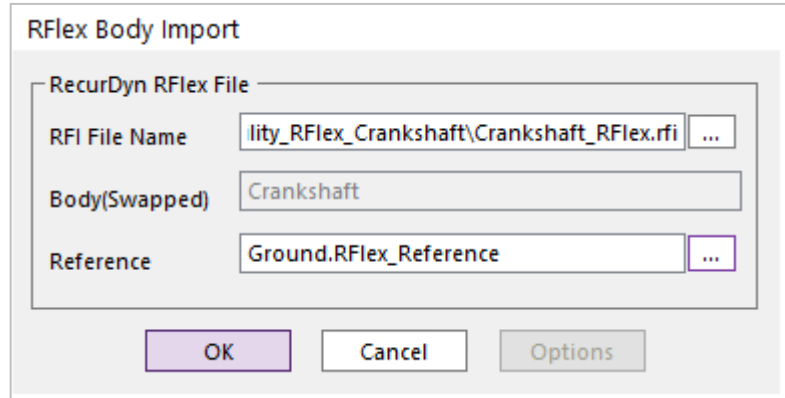


5. **RFlex Body Import** Dialog 에서 다음과 같이 작업합니다.
  - **RFI File Name** 영역의 "..." 버튼을 누릅니다.
  - **RD\_Durability\_4Cyl\_Engine\_Start.rdyn** 존재하는 경로에 위치한 **Crankshaft\_RFlex.rfi** 파일을 선택하도록 합니다.

- **Reference** 영역의 "..."  
버튼을 클릭합니다.
- 오른쪽 그림과 같이,  
**Database** 창에서  
Ground 에 속해있는  
**RFlex\_Reference**  
마커를 마우스로  
**Navigation Target**  
창으로 Drag&Drop 을  
합니다.



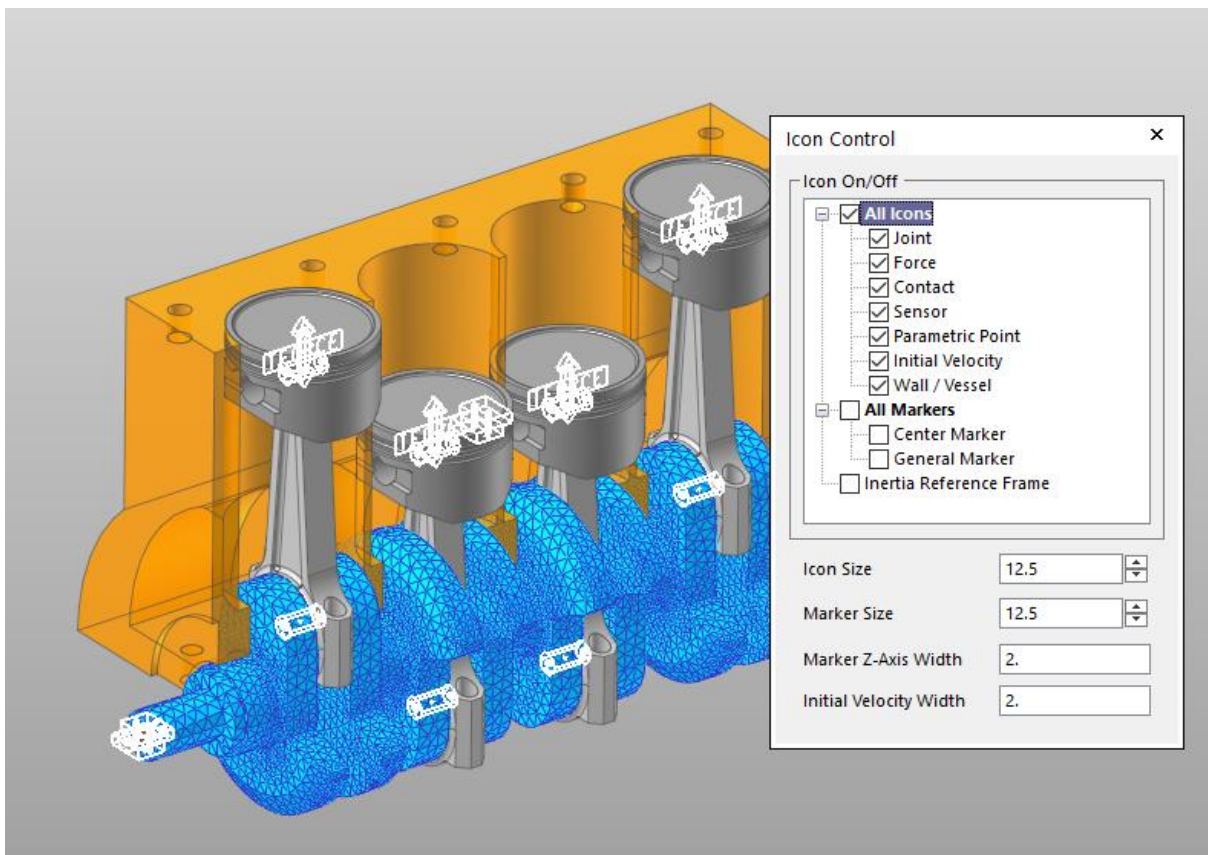
6. 오른쪽 그림과 같이, 최종적으로 선택된 상황이 올바르게 선택되었는지 확인한 후, **OK** 버튼을 누릅니다.



7. **Crankshaft Body** 가 **RFlex body** 로 교체된 것을 확인할 수 있습니다.



8. Toolbar 에서 **Icon Control** 버튼을 눌러, All Icons 을 모두 체크한 뒤, 결과를 확인하면, 기존 Crankshaft 에 적용된 모든 Joint 들이 RFlexBody1 에도 그대로 적용됨을 확인할 수 있습니다. 확인이 완료되었으면, 다시 체크를 해제하도록 합니다.

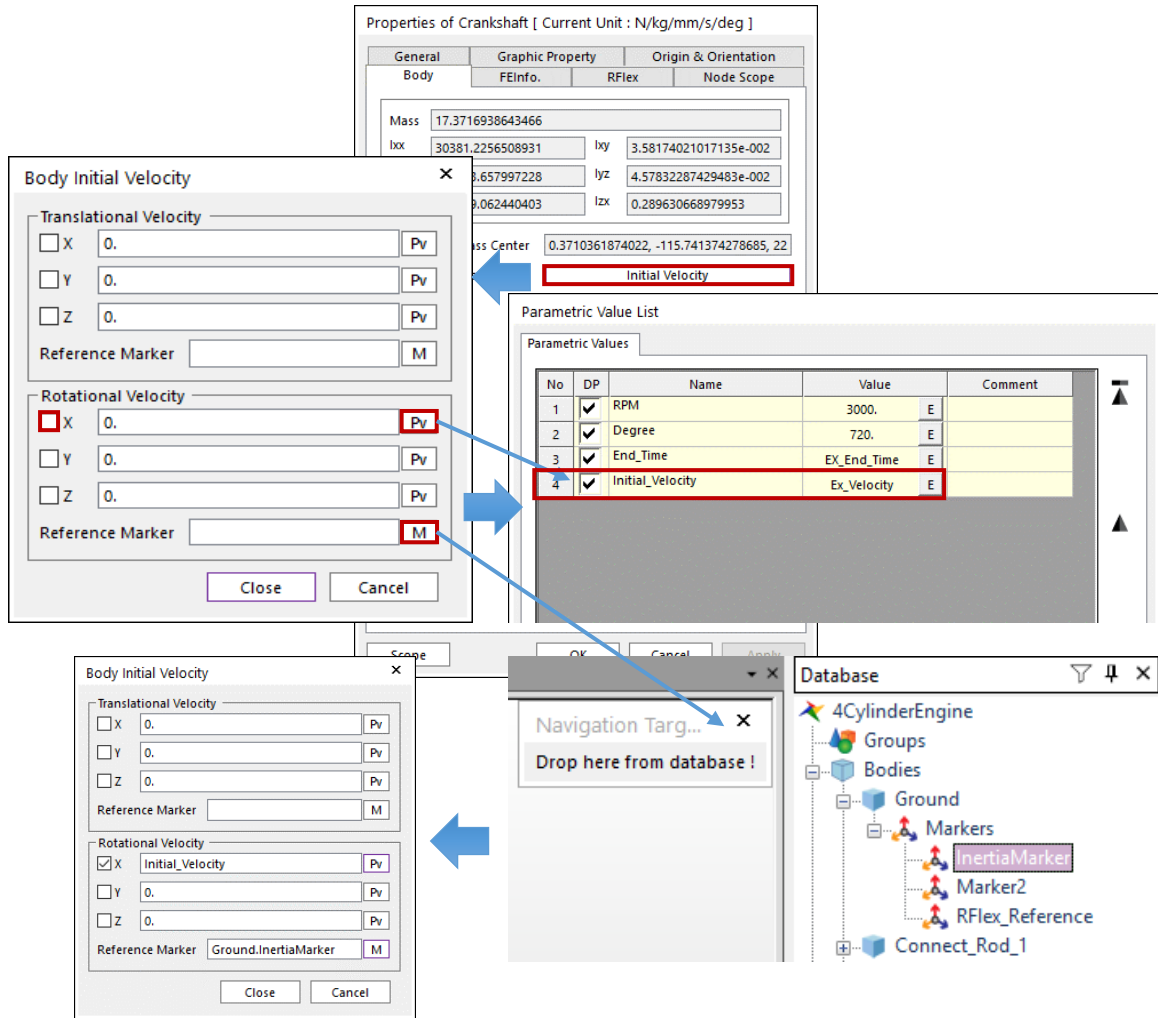


## RFlex Body 가 포함된 Dynamic 해석 및 결과 확인

**RFlex Body** 가 포함된 **Dynamic** 해석하기:

1. **Crankshaft** 을 선택한 뒤, 마우스 오른쪽 버튼을 눌러 **Properties** 를 선택합니다.
2. **Properties of RFlexBody1** Dialog 가 나타납니다.
3. **Properties of RFlexBody1** Dialog 에서 **Body** 탭을 선택한 뒤, **Initial Velocity** 버튼을 누릅니다.
4. **Body Initial Velocity** Dialog 에서 다음과 같이 작업합니다.
  - **Rotational Velocity** 에서 **X** 를 체크하고, **PV** 버튼을 누릅니다.
  - **Parametric Value List** Dialog 에서 **Initial\_Velocity** 를 선택합니다.
  - **Reference Marker** 영역의 **M** 버튼을 누릅니다.
  - **Database** 창에서 **Ground Inertia Marker** 를 마우스로 마우스로 **Navigation Target** 창으로 Drag&Drop 을 한 후, **Close** 를 눌러 Dialog 를 닫습니다.

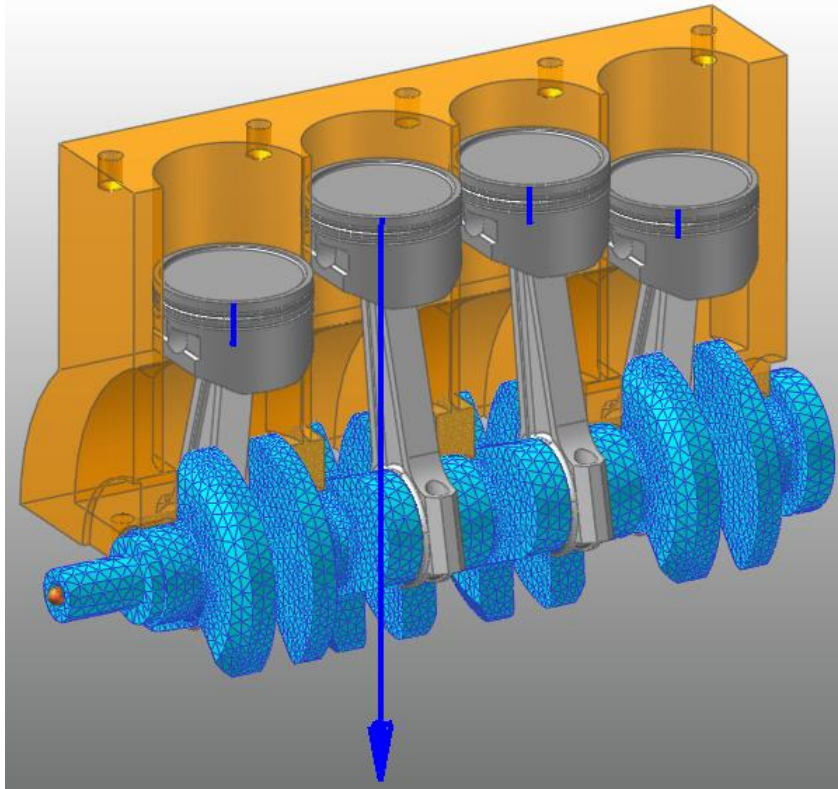
5. 전체 과정은 아래 그림과 같습니다.



6. **Analysis** 탭의 **Simulation Type** 그룹에서 **Dyn/Kin Icon** 을 선택하여 열린 Dialog 에서 다른 설정 변경 없이 **Simulation** 버튼을 눌러 해석을 수행합니다.

7. 오랜 시간이 걸리지 않고 Simulation 이 완료되면, Animation 상에서 이전 Crankshaft Body 가 존재했을 때와 유사한 결과를 확인할 수 있습니다.

**RFLEX CRANKSHAFT TUTORIAL (DURABILITY)**

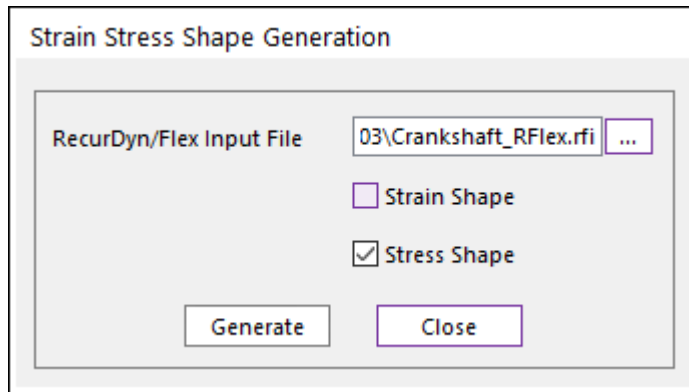




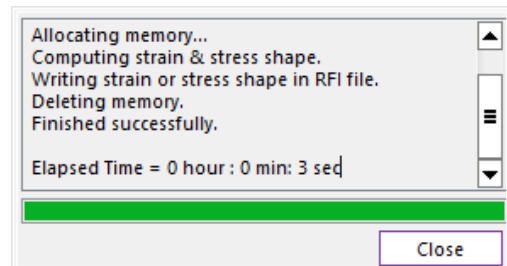
**RFlex Body** 의 **Stress** 분포 확인하기:



1. **Flexible** 탭의 **RFlex** 그룹에서 **Strain Stress Shape Generation** Icon 을 선택합니다.
2. 아래 그림과와 같이 **Stress Shape Generation** Dialog 가 나타납니다.
3. **Stress Shape Generation** Dialog 에서 다음과 같이 변경합니다.
  - **RecurDyn/Flex Input File** 에서 현재 사용하고 있는 RFI file 을 지정합니다.
  - **Stress Shape** 의 체크 버튼을 선택합니다.
  - **Generate** 버튼을 누릅니다.



4. 오른쪽 그림과 같이 **Stress Shape** 을 생성하는 과정을 새로운 Dialog 에서 문자열로 진행상황을 확인할 수 있습니다.



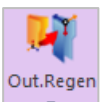
5. 이 과정이 완료되면, 각각의 Dialog 의 **Close** 버튼을 누르고, Dialog 에서 빠져 나옵니다.

---

**Tip:** 본 교재에서 제공되고 있는 RFI file 은 Mode Shape Information 만 가지고 있으므로, **Stress** 결과를 보기 위해서는 위와 같은 과정을 거쳐 기존 RFI file 에 **Stress Shape Information** 을 추가하는 과정을 거쳐야 합니다. 물론 본 과정을 거치면 RFI file Size 는 기존보다 커지게 됩니다.

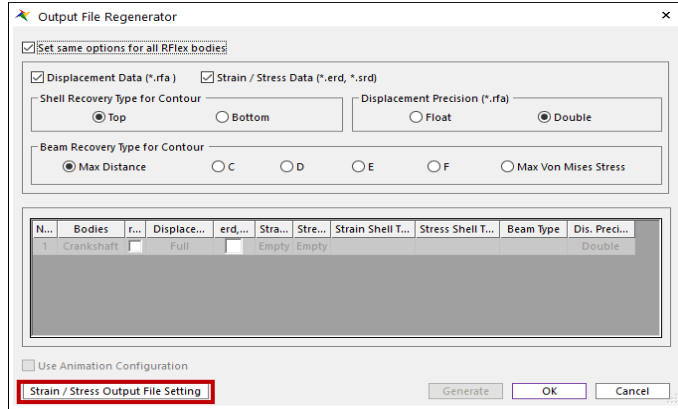
---

RecurDyn/RFlex 에서 Simulation 이후 **Stress** 결과를 **Contour** 로 확인하기 위해서는 **RFlex Body** 의 모든 **Node** 에 대해서 **Stress** 결과를 저장하고 있는 **Output File** 즉, \*.srd file 을 **Output Folder** 에 생성해야 합니다. 물론 **Output File** 을 생성하지 않고도 결과를 확인할 수 있지만, **Contour Animation** 실행 시, 진행 속도가 느려질 수 있으므로 추천하지 않습니다.

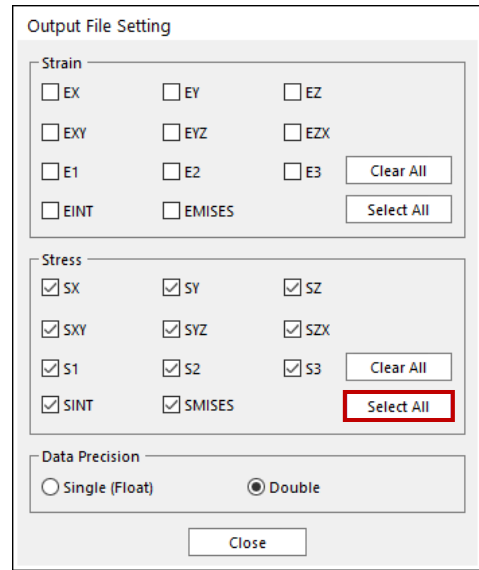


6. **Contour** Icon 아래에 위치한 **Output Regenerator** Icon 버튼을 선택합니다.

7. 오른쪽 그림과 같이 **Output File Generator** Dialog 가 나타납니다.
8. **Output File Setting** 버튼을 누릅니다.

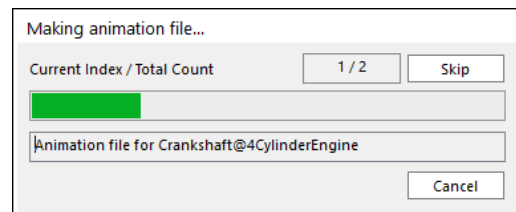


9. 오른쪽 그림과 같이 Output File Setting Dialog 가 나타납니다.
10. **Stress** 영역에 포함된 **Select All** 버튼을 누릅니다.
11. **Close** 버튼을 누릅니다.



**Tip:** Output File 생성 시, File Size 를 줄이기 위해서 기본적으로 Von-Mises, Sx, Sy, Sz 성분만 결과를 생성하도록 되어 있지만, 다른 Stress Component 에 대한 결과를 Contour 에서 확인하고자 할 때에는 모든 성분을 체크해 주어야 합니다.

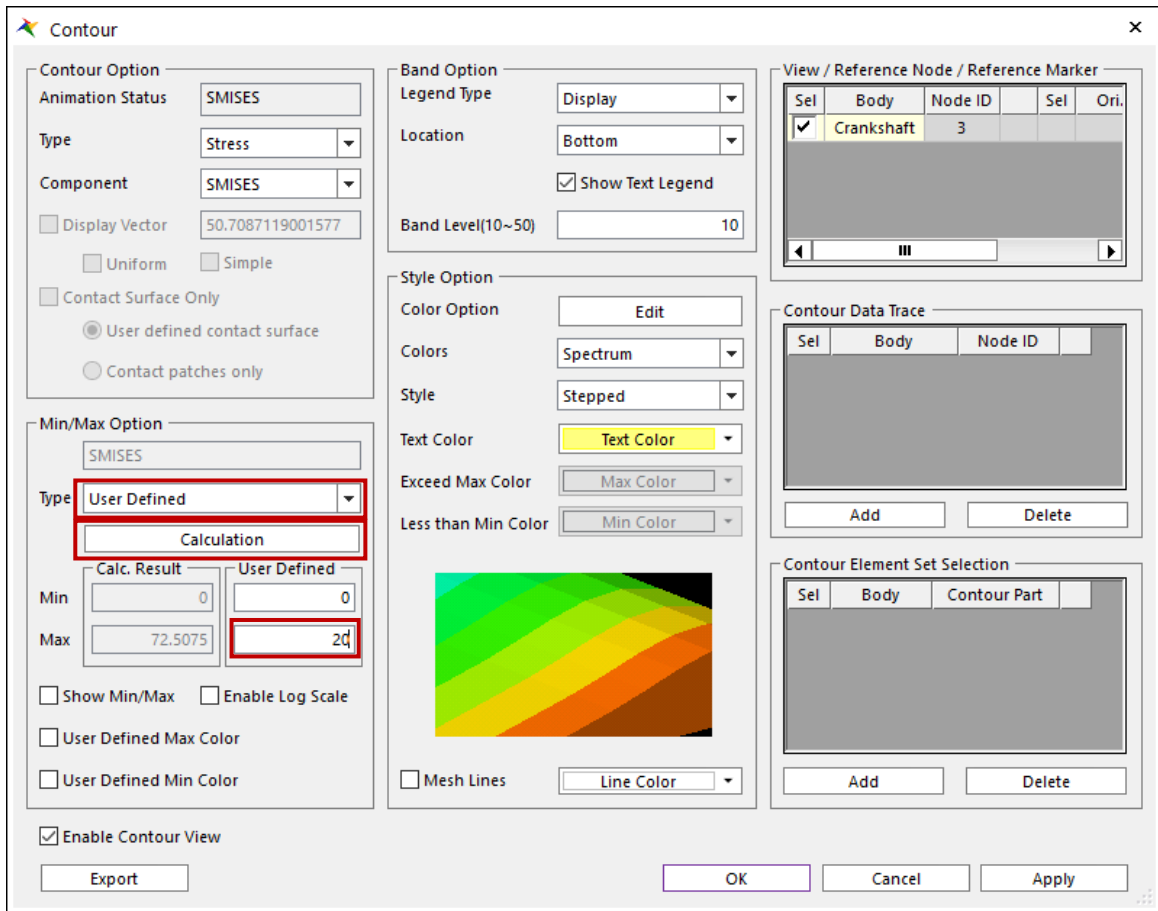
12. **Output File Regenerator** Dialog 에서 **Generate** 버튼을 누릅니다.
13. Progress Bar 와 함께 진행상황을 확인합니다. 진행이 완료되고 나면, Information 영역에 표시된 Stress 정보가 **Empty** 에서 **Full** 로 변경됨을 확인합니다. (**Tip:** 기본 설정으로 Output File 을 생성하였다면, Stress 정보는 Full 이 아닌 Partial 로 표기 될 것입니다. 왜냐하면 Stress Component 11 가지 결과 중, Von-Mises, Sx, Sy, Sz 만 생성되기 때문입니다.)





14. Flexible 탭의 RFlex 그룹에서 Contour Icon 을 선택합니다.

15. 아래와 같이, Contour Dialog 가 나타납니다.

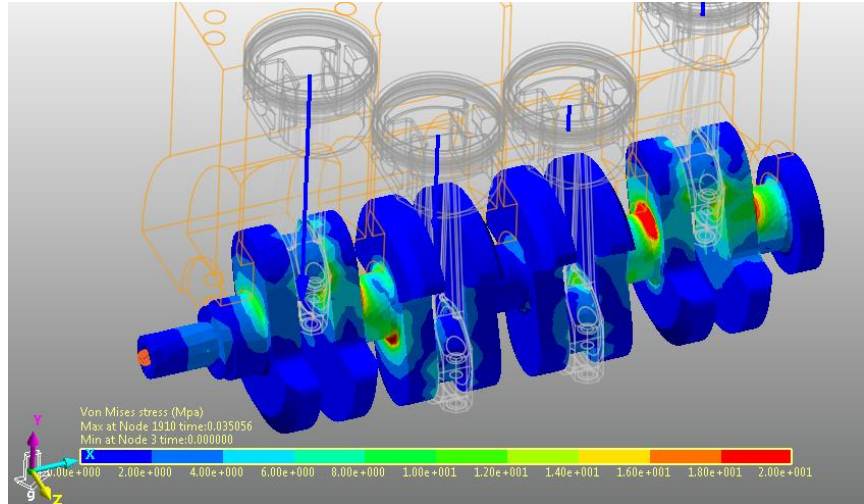


16. Contour Dialog 에서 다음과 같이 변경합니다.

- **Min/Max Option** 의 **Calculation** 버튼을 누릅니다.
- **Min/Max Option** 의 **Type** 을 **User Defined** 으로 변경합니다.
- **Max** 값에 **20** 을 입력합니다.
- **OK** 버튼을 눌러 Dialog 를 닫습니다.



- 17. **Animation Play**  
버튼을 누릅니다.
- 18. 오른쪽 그림과 같은  
결과를 확인할 수  
있습니다.



Chapter

4

## Durability Analysis 수행하기

### 목적

본 장에서는 완성된 RFlex Body 를 어떻게 Durability Analysis 하는지 배워봅시다.



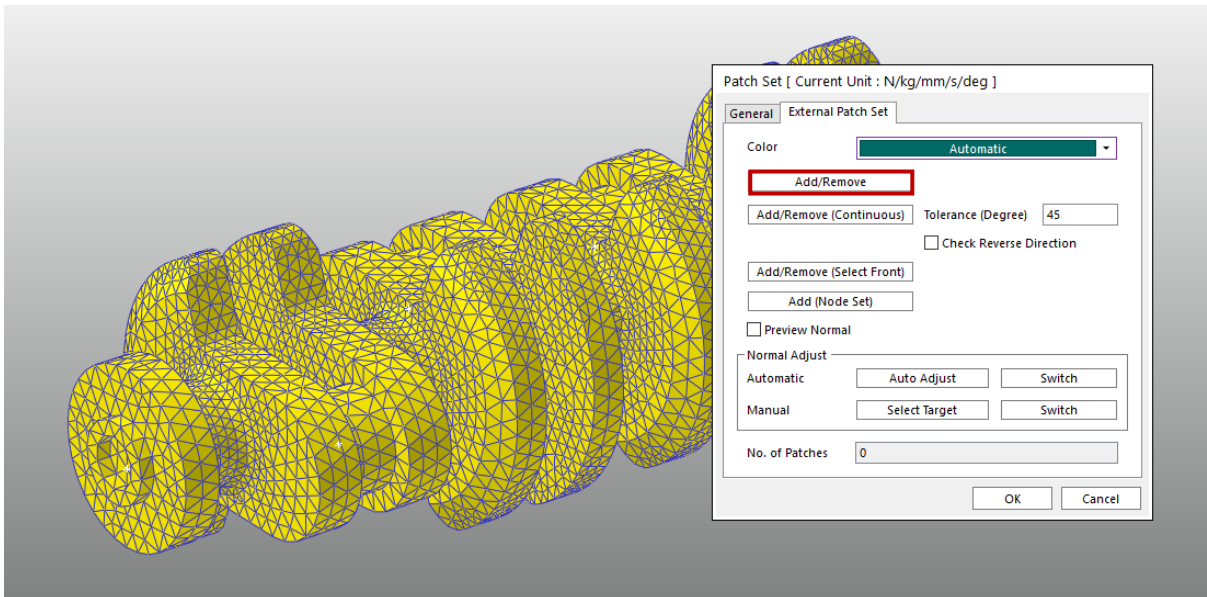
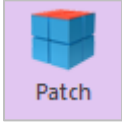
예상 소요 시간

30 분

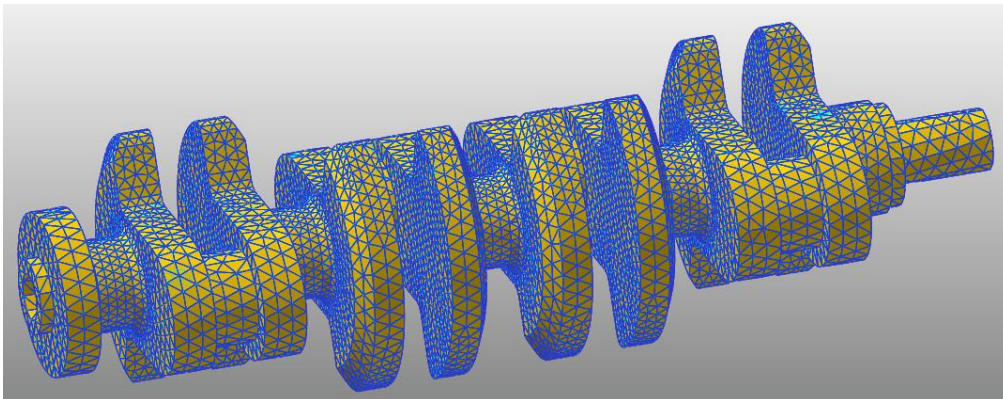
## Durability Analysis 수행하기

### Patch Set 생성하기:

1. **Crankshaft** 을 마우스로 더블 클릭하여, **RFlex Body Edit Mode** 로 진입합니다.
2. **RFlex Edit** 탭의 **Set** 그룹에서 **Patch Set** Icon 을 선택합니다.
3. 아래의 그림과 같이 **Add/Remove** 버튼을 선택하여 Mouse 왼쪽 버튼을 누른 채 마우스를 Drag 하여 Body 전체를 선택합니다.

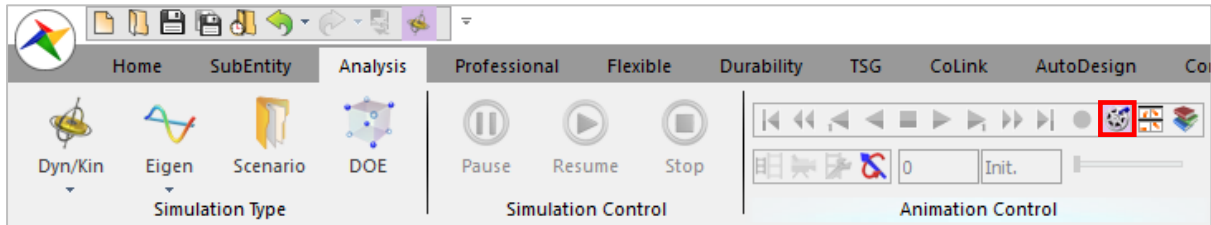


4. Mouse 오른쪽 버튼을 눌러 Pop-up Menu 에서 **Finish Operation** 을 선택합니다.
5. **Patch Set** Dialog 에서 **OK** 버튼을 누릅니다.
6. Patch Set 이 생성됨을 확인한 뒤, **RFlex Edit** 탭의 **Exit** 그룹에서 **Exit Icon** 을 눌러 상위 모드로 되돌아 옵니다.



**Animation File** 불러들이기:

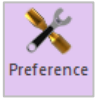
**Analysis** 탭의 **Animation Control** 그룹에서 “**Reload the last animation file**” 버튼을 누릅니다.



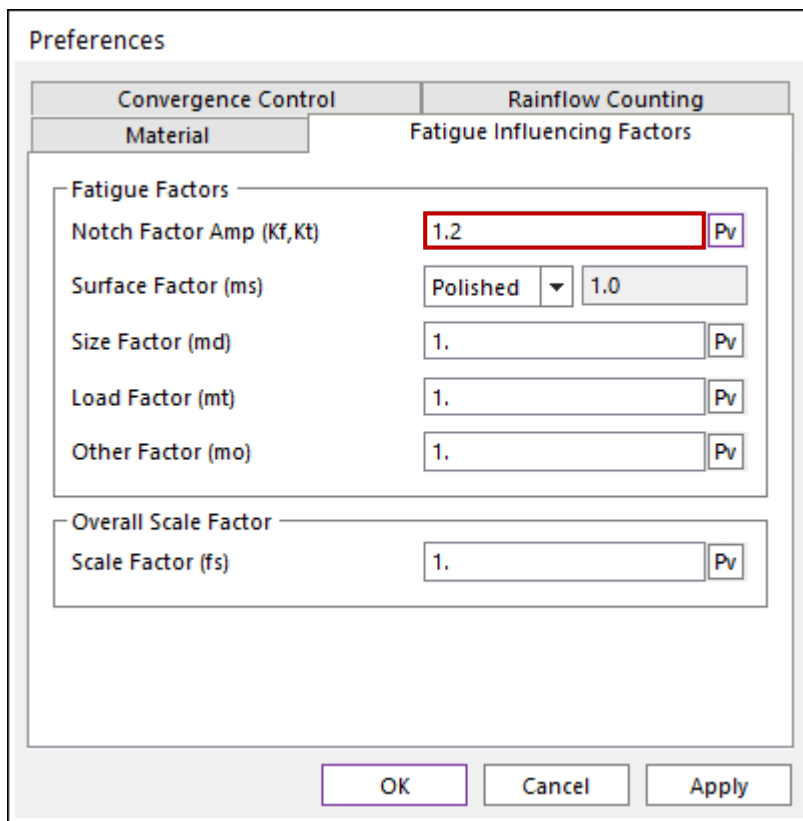
이후, Animation 과 관련된 버튼이 모두 활성화됨을 확인할 수 있습니다.

**Tip:** 앞서 RFlexBody1 에 대해서 Patch Set 을 생성하는 과정을 거치면서, 전 단계에서 해석한 결과를 사용할 수 없는 것처럼 보입니다. 하지만, 이 과정은 Dynamic 해석 결과에 아무런 영향을 주지 않으므로, 단순히 기존에 해석한 결과인 Animation file 즉, RAD file 만 다시 불러들이므로써 Dynamic Analysis 를 다시 수행할 필요가 없게 만듭니다.

**Preference** 설정하기



1. **Post Analysis** 탭의 **Durability** 그룹에서 **Preference Icon** 을 클릭하면 Preference Dialog 가 나타납니다.
2. **Preference Dialog** 에 포함된 **Material** 탭에서 **Fatigue Analysis** 에서 사용하게 될 **Material Library file** 의 경로를 확인합니다.  
(C:\Users\\Documents\RecurDyn\- 3. **Fatigue Influencing Factors** 탭을 선택하여 **Fatigue Factors** 에서 **Notch Factor Amp**



(**Kf, Kt**)의 값을 아래 그림과 같이 **1.2** 로 설정합니다.

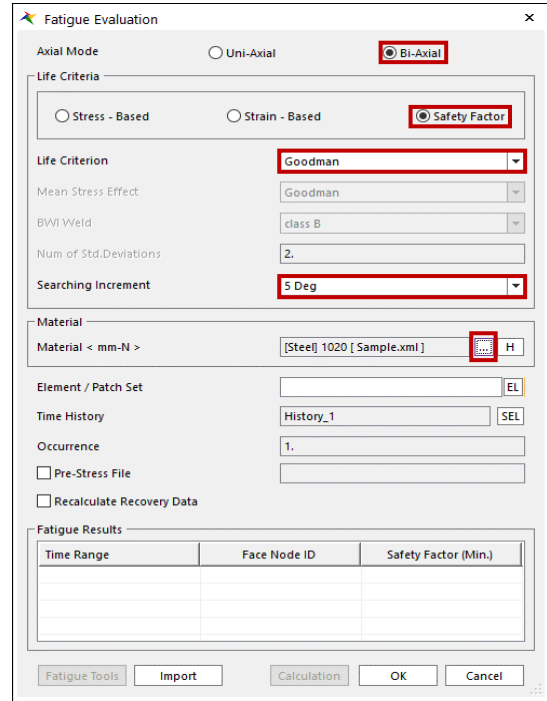
4. 이때, **Notch Factor** 의 의미는 구조물의 형상 설계 및 가공으로 인해 불가피하게 존재할 수 있는 Crack, Hole, Notch(V 자 홈) 등으로 인한 응력집중을 고려하여 해석적으로 도출된 응력 값을 보다 높게 예측하는 것입니다. 따라서 Notch Factor 의 값이 클수록 내구해석 결과는 가혹해 질 것입니다.
5. **Preference Dialog** 에서 **Convergence Control** 과 **Rainflow Counting** 에 설정된 값은 그대로 두고 **OK** 버튼을 눌러 Dialog 를 닫습니다.



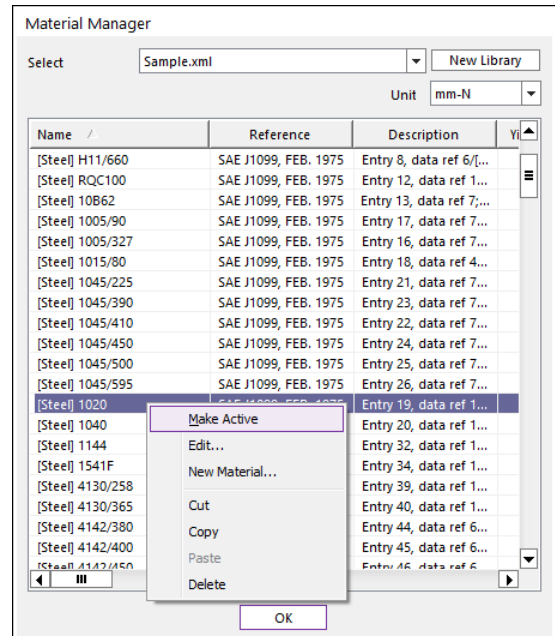
**Fatigue Evaluation** 실행하기



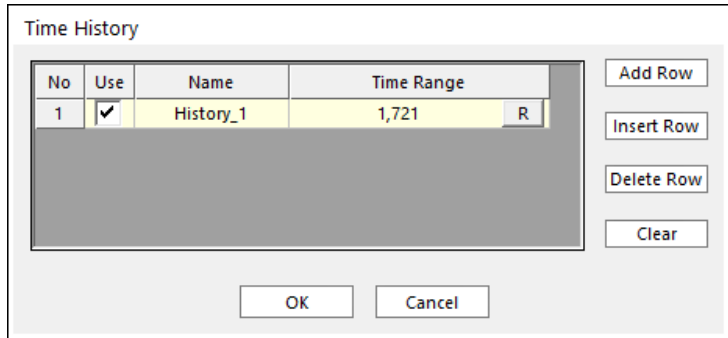
1. **Post Analysis** 탭의 **Durability** 그룹에서 **Fatigue Evaluation** Icon 을 선택합니다.
2. 그러면 **Fatigue Evaluation** Dialog 가 나타납니다.
3. **Fatigue Evaluation** Dialog 에서 다음과 같이 변경합니다.
  - **Axial Mode** 를 **Bi-Axial** 로 선택합니다.
  - **Life Criteria** 를 **Safety Factor** 로 변경합니다.
  - **Life Criterion** 은 **Goodman** 으로 선택합니다.
  - **Searching Increment** 는 **5 Deg** 로 수정합니다.



4. **Material** 항목에서 “...” 버튼을 선택합니다.
5. 그러면 **Material Manager** Dialog 가 나타납니다.
6. **Material Manager** Dialog 에서 다음과같이 변경합니다.
  - **[Steel] 1020** 을 선택하고 오른쪽 마우스 버튼으로 Pop-up Menu 를 이용하여 그림과 같이 **Make Active** 를 선택합니다.
  - **OK** 버튼을 누릅니다.

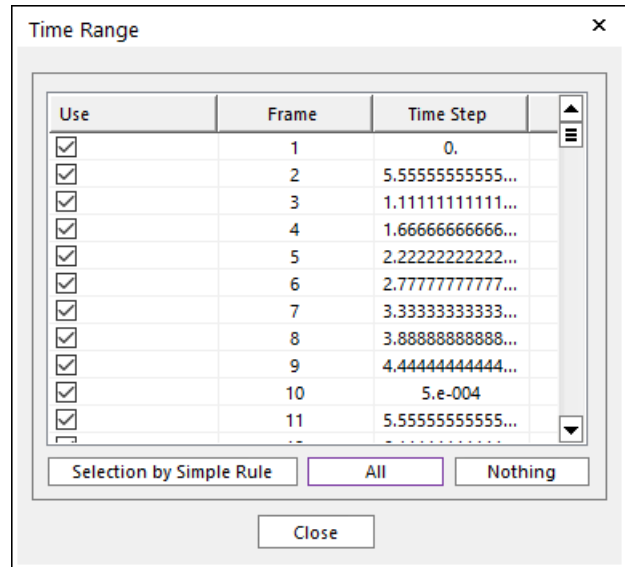


7. Element/Patch Set 에서 “EL” 버튼을 누릅니다.
8. 마우스를 이용하여 화면상에서 **RFlexBody1** 에 설정된 **Patch Set** 을 선택합니다.
9. **Time History** 에서 “SEL” 버튼을 누릅니다.

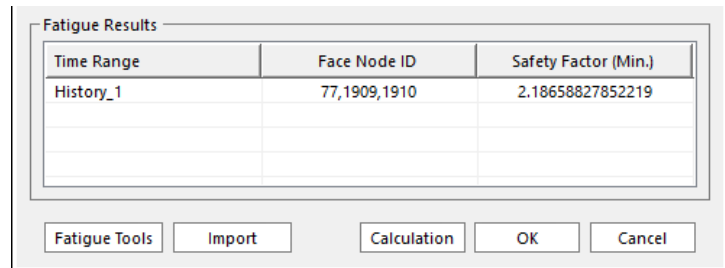


10. **Time History Dialog** 을 보면 Time History set 이 하나 만들어져 있습니다. 시간 영역을 변경하기 위해 “R” 버튼을 클릭합니다.

11. **Time Range Dialog** 에서 “All” 선택한 후, **Close** 버튼을 누릅니다.
12. OK 버튼을 눌러 Time History Dialog 을 닫습니다.



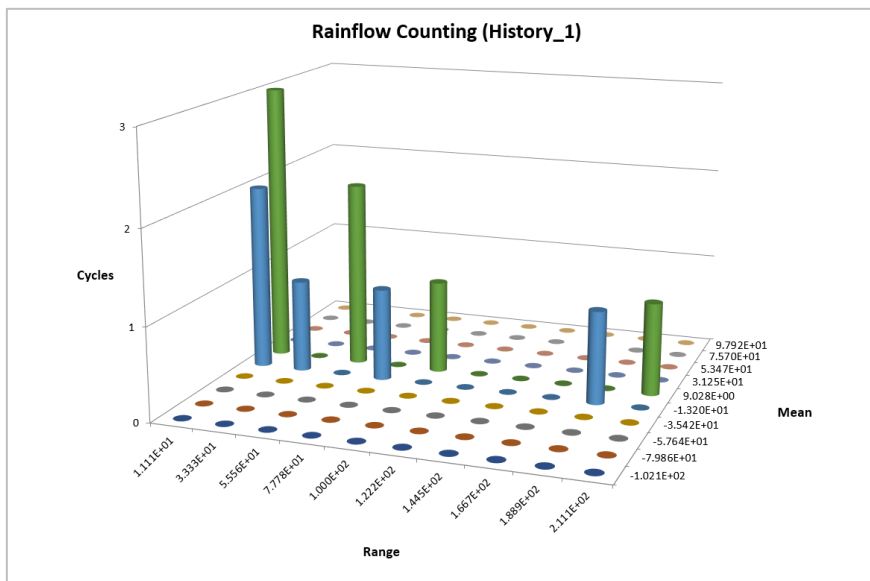
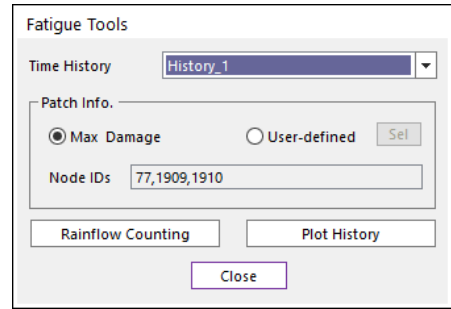
13. **Calculation** 을 누릅니다.
14. Fatigue Analysis 진행 상황을 알려주는 Progress Bar 가 나타나고, 완료가 되면 오른쪽 그림과 같은 결과를 얻을 수 있습니다.



15. **Fatigue Evaluation** Dialog 에서 가장 왼쪽 좌측 하단에 위치한 **Fatigue Tools** 버튼을 눌러 Dialog 를 띄웁니다.

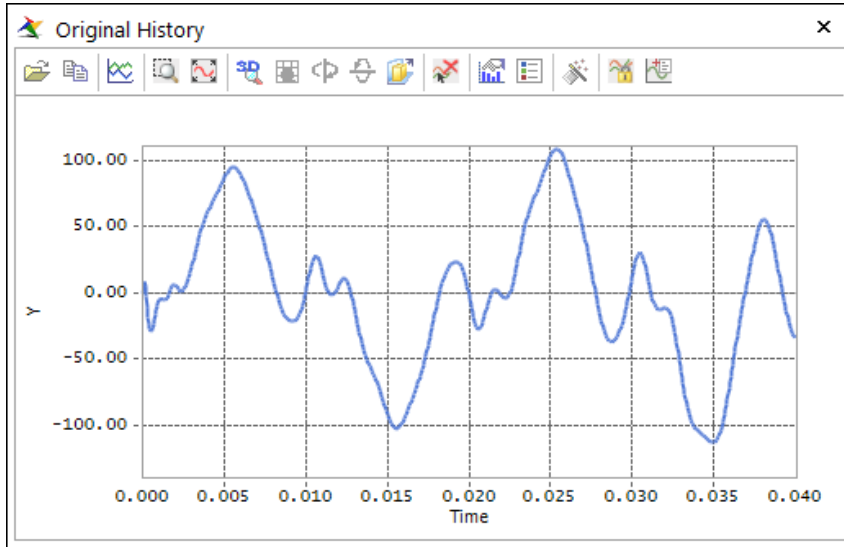
- **Fatigue Tools** Dialog 에서 **Rainflow Counting** 버튼을 누릅니다.

아래 그림과 같이, Excel file 에 Damage 가 가장 크게 나타난 Patch 영역에 적용된 Stress Time History 를 바탕으로 Rainflow Counting 을 수행한 결과를 보여줍니다. 결과는 Stress Amplitude 와 Mean Stress 에 따른 Cycle 수가 나타납니다.



- **Fatigue Tools** Dialog 에서 **Plot History** 버튼을 누릅니다.

아래 그림과 같이, Damage 가 가장 크게 도출되는 Patch 영역에 적용된 Stress Time

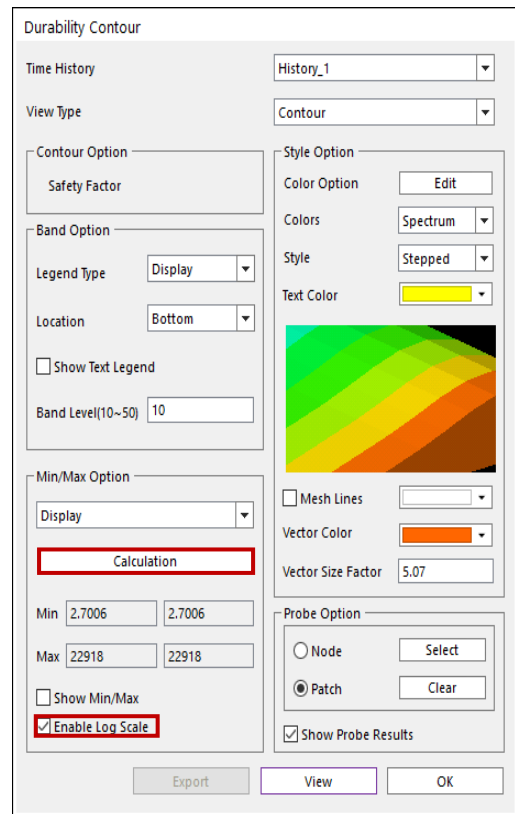


History 를 Plot 으로 확인할 수 있습니다.

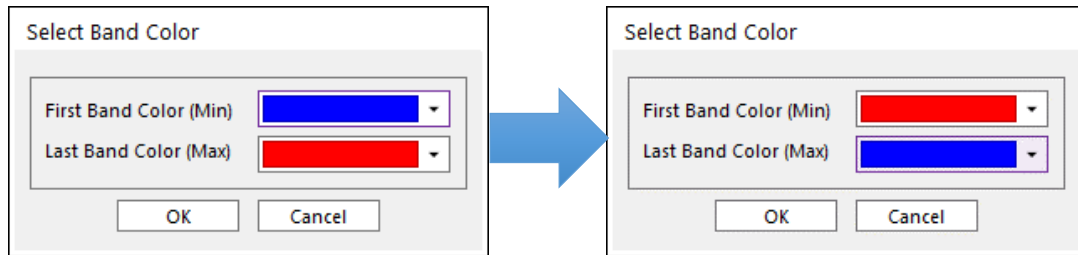
**Contour** 결과 확인하기:



1. **Post Analysis** 탭의 **Durability** 그룹에서 **Contour** Icon 을 선택합니다.
2. **Durability Contour** Dialog 가 나타납니다.
3. **Durability Contour** Dialog 에서 다음과 같이 변경합니다.
  - Dialog 중간에 위치한 **Calculation** 버튼을 누릅니다.
  - "Enable Log Scale"를 체크합니다.
  - **Contour View** 버튼을 눌러 결과를 확인합니다.

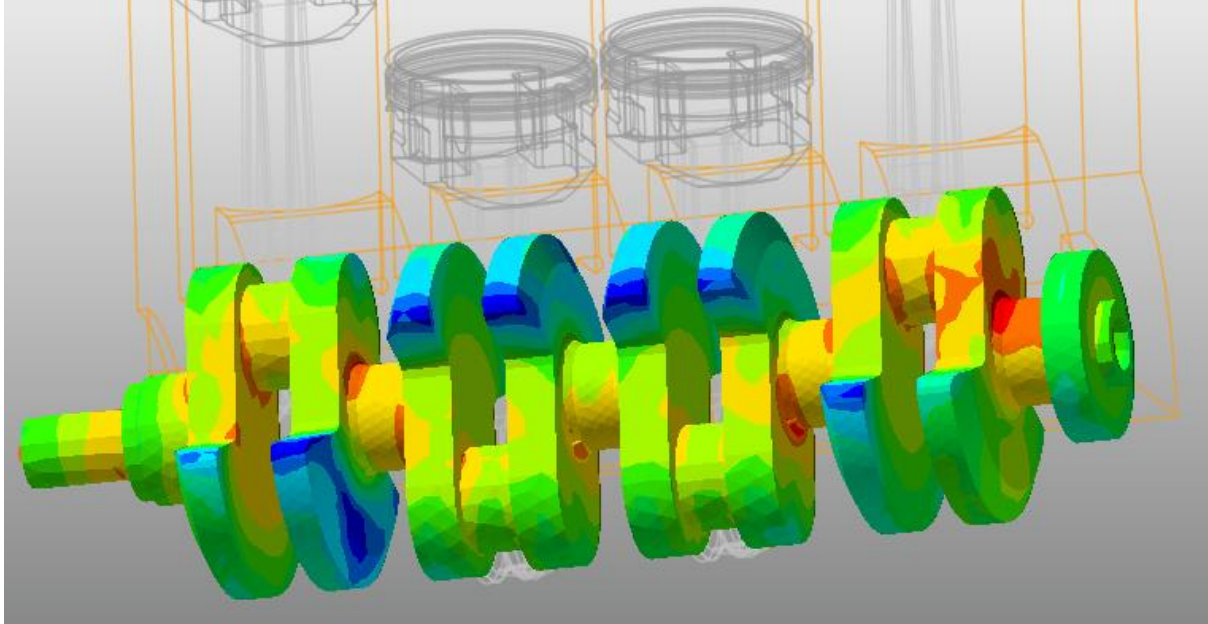


4. Contour 결과를 확인해 보면, 붉은색 부분이 Safety Factor 값이 크므로 설계상 문제가 없는 영역이므로, Durability Contour Dialog 에서 결과를 보다 시각적으로 판단하기 위해서 **Style**



**Option** 의 **Edit** 버튼을 눌러 다음과 같이 변경합니다.

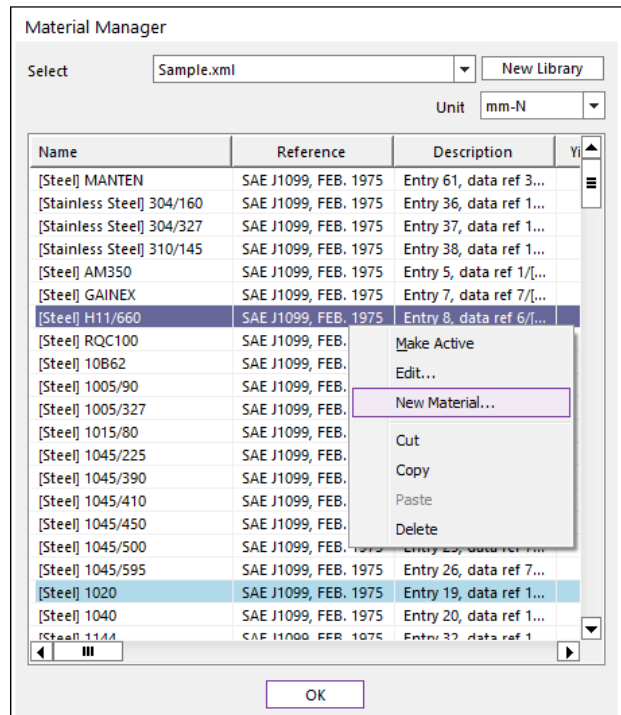
- 다시 **Contour View** 버튼을 누르면 아래 그림과 같이, Safety Factor 값이 가장 작은 부분이 붉은색으로 나타나면서 Safety Factor 값이 상대적으로 작은 영역을 쉽게 확인할 수 있습니다. (Tip: 이때, Contour Plot 결과를 더 자세히 보기 위해서, Toolbar 에 위치한 **Wireframe**



Icon 을 선택한 뒤, 결과를 확인해야 합니다.)

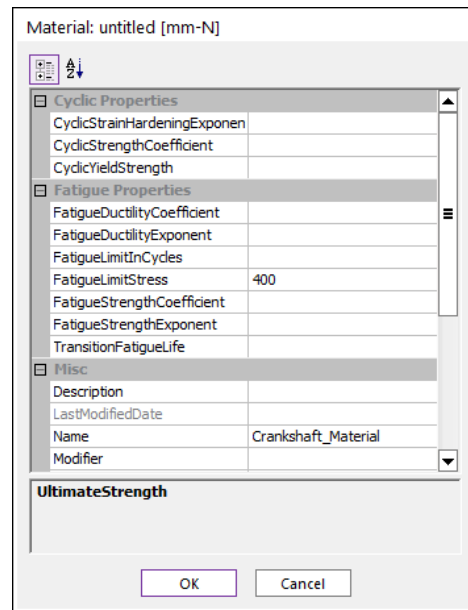
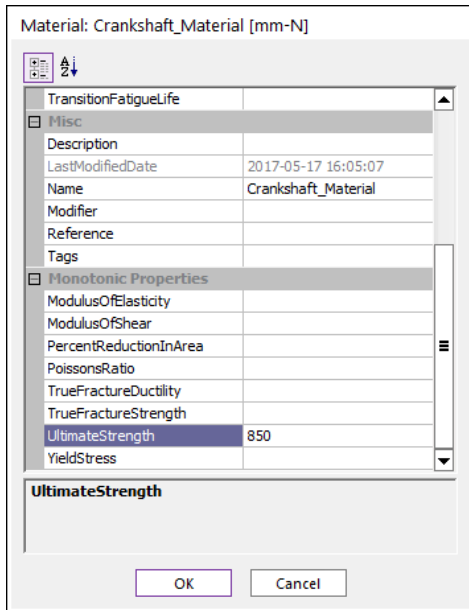
**Material** 변경 후, **Safety Factor** 다시 구하기:

- Fatigue Evaluation** Dialog 에서 **Material** 영역의 “...” 버튼을 누릅니다.
- Material Manager** Dialog 가 나타납니다.
- 오른쪽 그림과 같이, Pop-up Menu 에서 **New Material** 을 선택합니다.



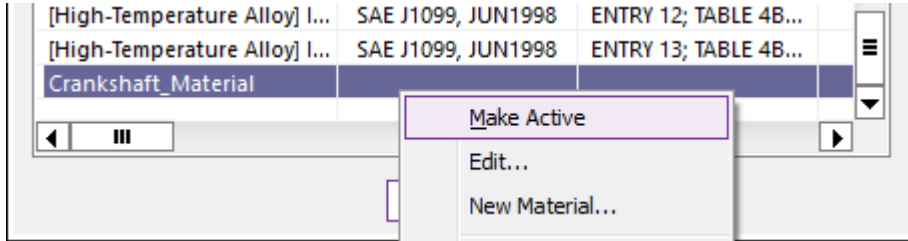
4. **New Material** 생성을 위한 Dialog 에서 다음과 같이 변경합니다.

- **FatigueLimitStress** 영역에 **400** 을 입력합니다.
- **Name** 은 **Crankshaft\_Material** 로 입력합니다.
- 마지막으로 **UltimateStrength** 영역에는 **850** 을 입력합니다.
- **OK** 버튼을 누릅니다.

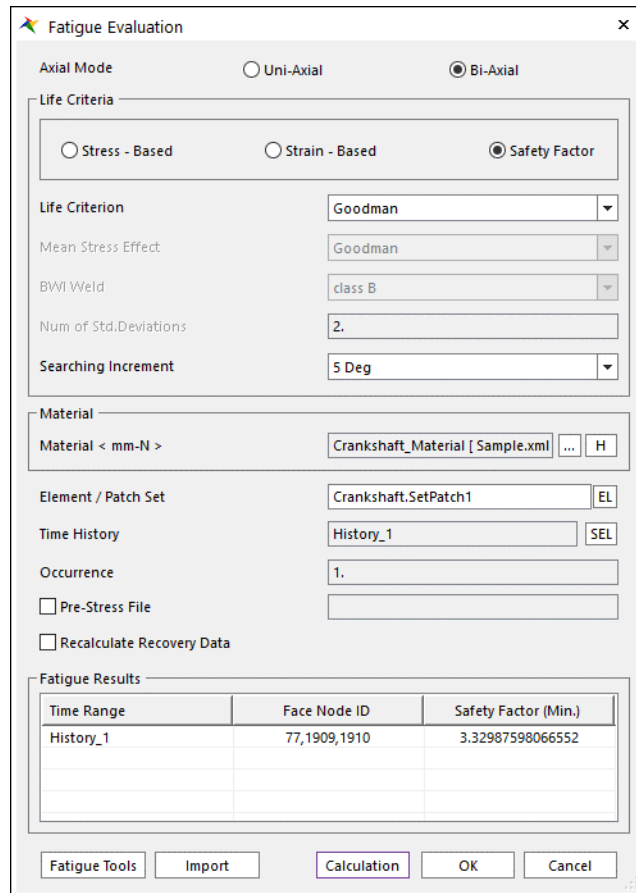


**Tip:** Safety Factor 를 구하기 위해서 Material Property 로부터 필요한 정보는 Fatigue Limit Stress와 Ultimate Strength 입니다. 하지만 Material Library 에서 제공되고 있는 Material Property 정보에는 Fatigue Limit Stress 를 제공하고 있지 않습니다. 이럴 경우에는 Fatigue Limit Stress 정보를 Cyclic Yield Stress 로 대체하여 Safety Factor 결과를 구할 때 사용하게 됩니다. 그러나 지금같이, Safety Factor 계산을 위해 새롭게 Material 을 생성할 때에는 Fatigue Limit Stress 를 직접 입력하도록 합니다.

- 다시 **Material Manager** Dialog 에서 새롭게 생성된 **Crankshaft\_Material** 을 아래의 그림과 같이, 마우스 오른쪽 버튼 클릭 후 Pop-up Menu 에서 **Make Active** 를 선택한 후, **OK** 버튼을 누릅니다.



- Fatigue Evaluation** Dialog 에서 **Calculation** 버튼을 누릅니다.
- 아래의 그림과 같이 Safety Factor 대해서 다시 계산된 결과를 얻을 수 있습니다. 새로 생성한 Crankshaft Material 의 두 데이터 Fatigue Limit Stress 와 Yield Stress 값이 [Steel] 1020 보다 훨씬 큰 값으로 설정되었으므로, Minimum Safety Factor 결과가 이전 결과보다 크게 나타남을 확인할 수 있습니다.



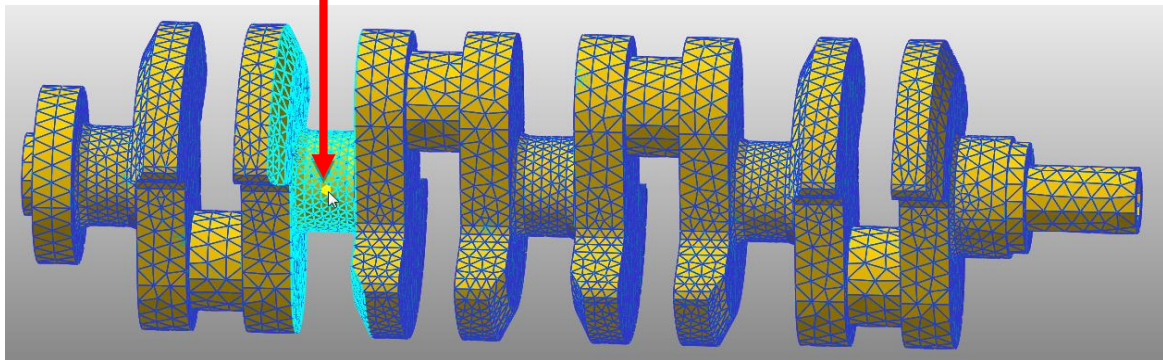
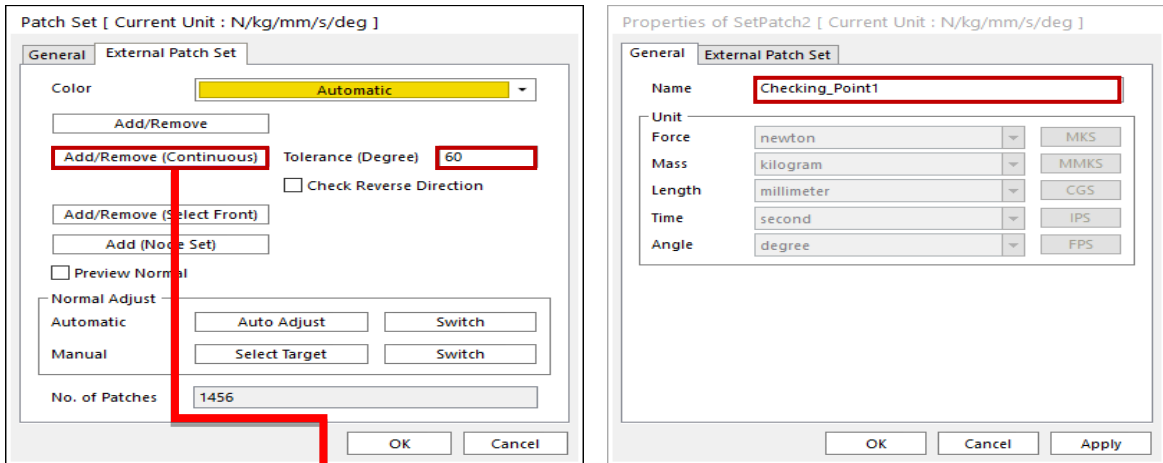


**Patch Set** 재설정 후, **Safety Factor** 다시 구하기:

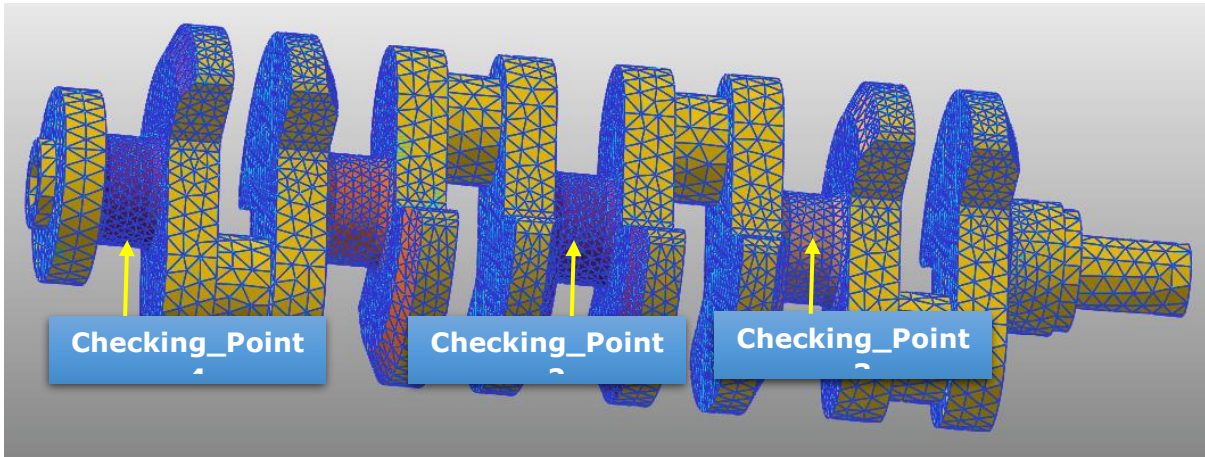
앞선 과정에서는 RFlex Body 의 모든 표면을 Patch Set 으로 선택하여 Safety Factor 를 구하였습니다. 따라서, 이를 계산하기 위해서 상당한 시간이 소요됨을 확인할 수 있습니다. 만약 계산 시간을 단축하고, Von-Mises Stress Contour 결과를 바탕으로 특정 부분들에 대해서 피로해석 결과를 확인해 보고자 한다면, 특정 부분만 Patch Set 으로 설정하도록 해야 합니다. 다음은 이와 같은 과정에 대한 설명합니다.

1. **RFlexBody1** 를 더블 클릭하여, **RFlex Body Edit Mode** 로 진입합니다.
2. **RFlex Edit** 탭의 **Set** 그룹에서 **Patch Set** Icon 을 선택합니다  
그러면 **Patch Set** Dialog 가 나타납니다.
3. **Patch Set** Dialog 에서 다음과 같이 변경합니다.
  - **Tolerance (Degree)** 값을 **60** 으로 입력합니다.
  - **Add/Remove (Continuos)** 버튼을 누른 뒤, 아래의 그림처럼 마우스로 선택하고자 하는 Element 하나를 선택합니다.
  - 선택된 Patch 와 주변의 Patch 의 Normal Vector 의 각도 차이가 60 도 범위 내에 포함되면 자동으로 Patch Set 으로 선정됩니다.
  - 마우스 우 클릭을 한 후, Pop-up Menu 에서 Finish Operation 을 선택합니다.

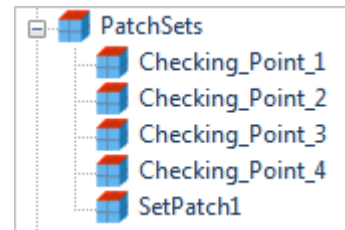
- **General Tab** 을 선택한 뒤, **Checking\_Point\_1** 으로 이름을 변경합니다.



- 과정 3 번을 반복하여, Patch Set 을 아래와 같이 세 개 더 생성합니다. 이때, 각각의 Patch Set 이름은 **Checking\_Point\_2, Checking\_Point\_3, Checking\_Point\_4** 가 되도록 합니다.



본 과정을 통해 네 개의 Patch Set 이 성공적으로 생성되면, 오른쪽 그림과 같이 Database 에 Patch Set 생성 정보를 알 수 있게 됩니다.



- Patch Set 이 생성됨을 확인한 뒤, **RFlex Edit** 탭의 **Exit** 그룹에서 **Exit Icon** 을 눌러 상위 모드로 되돌아 옵니다.
- Analysis** 탭의, **Animation Control** 그룹에서 “**Reload the last animation file**” 버튼을 누릅니다.
- Post Analysis** 탭의 **Durability** 그룹에서 **Fatigue** Icon 을 눌러 Dialog 를 띄운 후, 나머지 설정은 그대로 둔 채, **Element/Patch Set** 입력란에 기존 이름을 지우고, **Crankshaft.Checking\_Point\_1** 를 직접 입력합니다.
- Calculation** 버튼을 눌러 계산 결과를 확인합니다.
- 계산 시간이 이전보다 상당히 빨라짐을 확인할 수 있습니다.
- OK** 를 버튼을 누릅니다.

Fatigue Evaluation

Axial Mode  Uni-Axial  Bi-Axial

Life Criteria

Stress - Based  Strain - Based  Safety Factor

Life Criterion Goodman

Mean Stress Effect

BW1 Weld class B

Num of Std.Deviations 2

Searching Increment 5 Deg

Material

Material < mm-N > Crankshaft\_Material [ Sample.xml ] ... H

Element / Patch Set Crankshaft.Checking\_Point1 [EL]

Time History History\_1 [SEL]

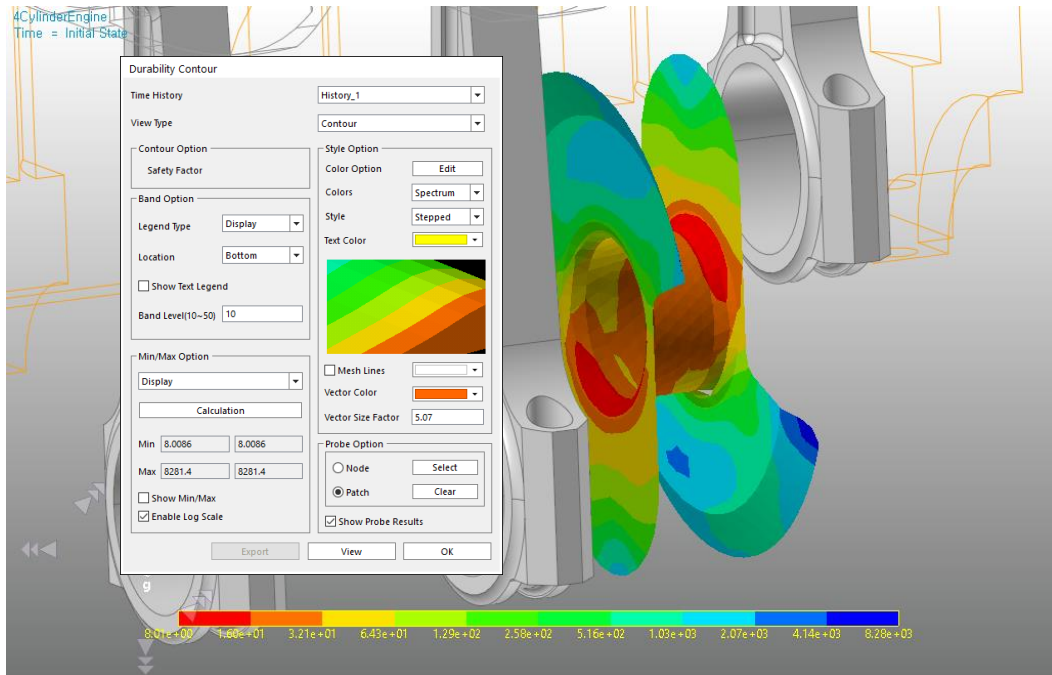
Occurrence 1

Fatigue Results

Time Range	Face Node ID	Safety Factor (Min.)
History_1	1552,1550,256	7.13752291875641

Fatigue Tools Import Calculation OK Cancel

11. **Post Analysis** 탭의 **Durability** 그룹에서 **Contour Icon** 을 선택한 후, Contour Dialog 에서 **Calculation** 버튼을 누른 뒤, **Contour View** 버튼을 선택하면 아래와 같이



**Checking\_Point\_1** 에 대한 결과를 확인할 수 있습니다.

12. 마찬가지로 방법으로 **Checking\_Point\_2, Checking\_Point\_3, Checking\_Point4** 에 대해서도 결과를 확인할 수 있습니다.



## 결과 분석 및 검토

### 목적

본 장에서는 모델의 Safety Factor 결과를 분석하고 검토해봅시다.



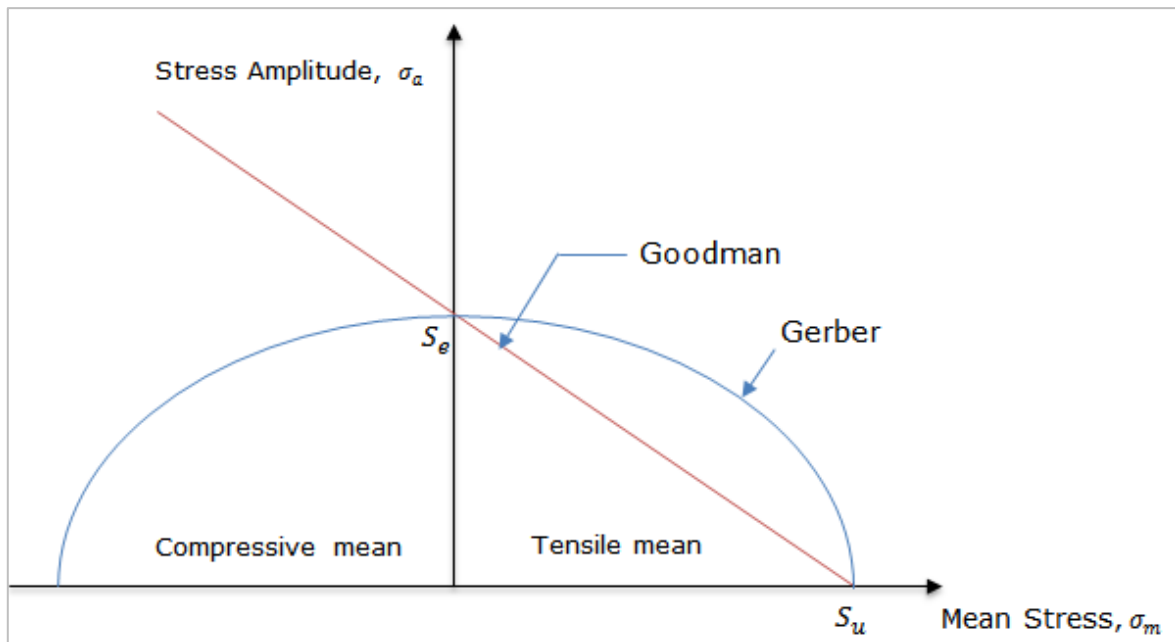
### 예상 소요 시간

10 분

## Safety Factor 결과 분석하기

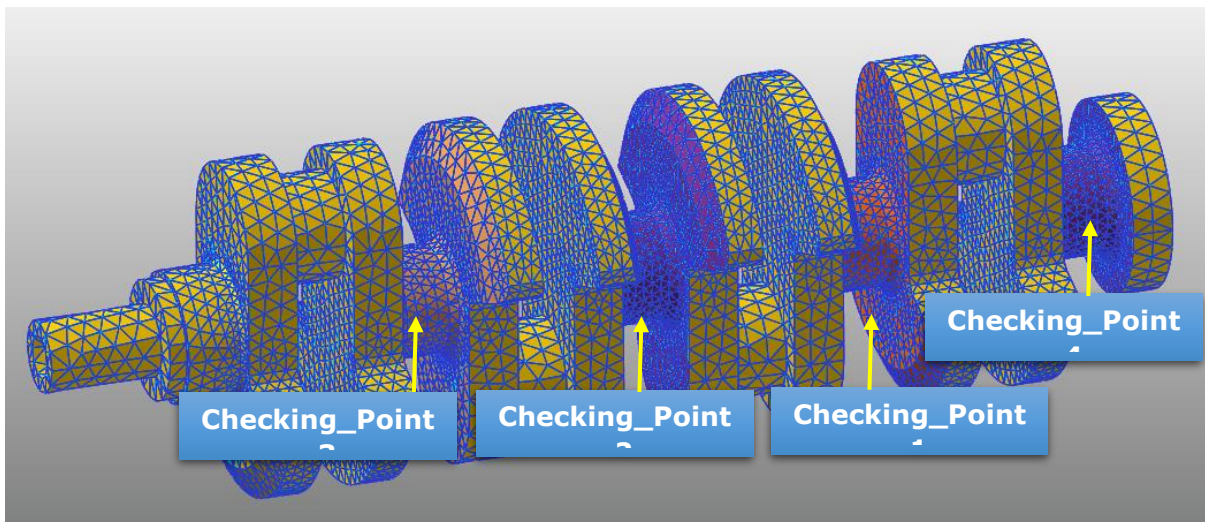
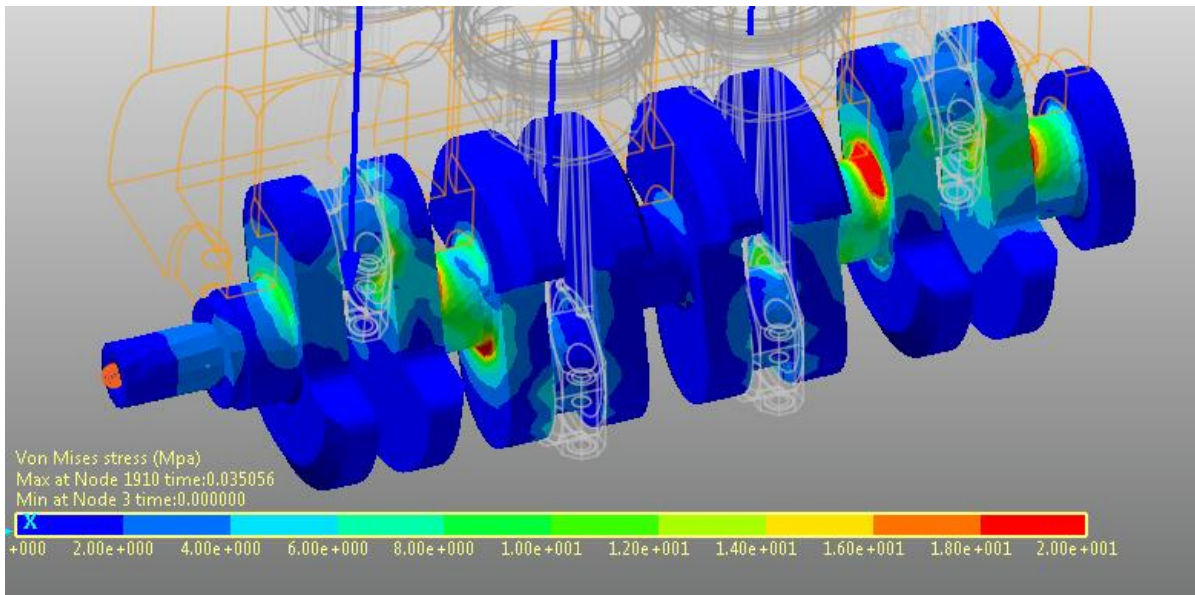
내구해석을 통해 얻을 수 있는 피로결과에는 피로수명(Fatigue Life) 이외에도 안전률(Safety Factor)을 얻을 수 있습니다. 일반적으로 최대응력과 허용응력과의 관계를 Safety Factor 로 표현하지만, 피로해석을 통해 구해지는 Safety Factor 는 이와 의미가 다릅니다.

- 아래 그림과 같이, 피로한도(Fatigue Limit Stress)와 극한응력(Ultimate Strength)의 관계로 이루어진 직선(Goodman 방식)과 포물선(Gerber 방식) 방정식으로부터, 내구해석을 위해 필요한 Rainflow Counting 결과(Mean Stress, Stress Amplitude)를 이용하여 Minimum



Safety Factor 를 구하게 됩니다.

- 따라서, Safety Factor 를 구하기 위해 필요한 물성치는 Fatigue Limit Stress 와 Yield Stress 2 가지 정보면 충분합니다. 이는 본 교재에 포함된 New Material 생성과정에서 두 가지 정보만으로 Crankshaft Material 을 생성하고, 이를 이용하여 Safety Factor 를 구하는 방법에 대해서 수행해 보았습니다.
- 앞서 수행한 첫 번째 내구해석에서는 RFlex Body 전체에 대한 Patch Set 을 생성하여 Safety Factor 를 구할 때 소요되는 시간은 약 2 분 정도 소요됩니다. ( PC 사양에 따라 다를 수 있습니다.) 이는 상대적으로 긴 시간일 수 있습니다. 따라서 이와 같은 시간을 줄이기 위해서 Von-Mises Stress 분포를 RFlex/Contour 에서 확인하여 구조물의 취약부를 확인한 뒤, 취약부분만 Patch Set 으로 설정하면 내구해석 시간을 대폭 줄일 수 있습니다. 이는 내구해석 조건을 변경하면서 반복적으로 피로결과를 얻어야 할 때에는 필수적입니다.



- 앞서 설명한 바와 같이, 기존에 선정된 [Steel]1020 과 새롭게 생성된 Crankshaft Material 을 가지고 4 개의 Patch Set 을 바탕으로 도출된 Safety Factor 들을 비교하면 다음과 같습니다.

Material Patch Set	Minimum Safety Factor	
	Crankshaft material	[Steel] 1020
Checking_Point_1	7.389	4,300
Checking_Point_2	13.340	8,361
Checking_Point_3	7.896	4.599
Checking_Point_4	3.403	2.186

- Crankshaft Material 에서 비례한도와 항복응력 값을 [Steel]1020 보다 크게 설정하였으므로, 도출되는 가장 작은 Safety Factor 의 결과는 더 높게 도출됩니다. 또한 Safety Factor 가 가장 작게 도출되는 영역은 Checking Point 4 임을 확인할 수 있습니다.

- 일반적으로 구조물에서 Safety Factor 는 최대응력과 항복응력의 관계로 표현할 수 있습니다. 만약 본 교재에서 사용한 Crankshaft 의 Checking\_Point\_4 지점에서 최대 응력이 72Mpa 이고, [Steel]1020 의 항복응력이 262Mpa 이라고 한다면 Safety Factor 는 간단히  $262/72=3.63$  으로 표현할 수 있습니다. 하지만 본 교재를 통해 얻은 결과는 2.24 로 차이가 있음을 확인할 수 있습니다.
- 만일 Crankshaft 가 엔진내부에서 동적 하중을 받지 않고, 정적 하중만 받는 상태라면 항복응력과 최대응력으로 Safety Factor 를 구하는 것이 의미가 있습니다. 하지만 Crankshaft 와 같이 동적 거동을 보이는 구조물에 대해서는 피로해석을 통해 도출되는 Safety Factor 가 의미가 있게 됩니다.

*Thanks for participating in this tutorial*