

RecurDyn

Professional

Training Guide

Contents

Chapter 1. Introduction	4
Chapter 2. Pre-processor Interface.....	25
Chapter 3. Post-processor Interface	51
Chapter 4. Rigid Body, Marker and Geometry	74
Chapter 5. Object Control and Joint	102
Chapter 6. Joint and Motion	128
Chapter 7. Primitive Joint and Subsystem	152
Chapter 8. Force.....	177
Chapter 9. Contact.....	206
Chapter 10. Expression and Request	242
Chapter 11. Model Settings	258

RD Professional 교육 커리큘럼

이 교재는 RD(RecurDyn) Professional 제품의 기본적인 사용법 및 해석수행방법에 대한 교육을 위해 제작되었습니다.

이 교재는 Lecture와 Workshop으로 구성되어 있으며, Lecture를 통해 사용법의 기초적인 지식을 습득할 수 있으며 Workshop을 통해 직접 모델링과 해석과정을 수행하여 수강자의 기술습득에 도움을 주게 됩니다.

Lecture 이수시간은 10~20분이며 강사는 교재의 내용에 충실하게 강의를 진행합니다.

Workshop시간은 30~60분 정도 소요되며 모델의 복잡성과 난이도에 따라 달라집니다.

교육시간은 하루 09:00~ 17:30분까지이며 3일간 진행됩니다.

Day 1	Day 2
Ch1~Ch5	Ch6~Ch10
MDB에 대한 이해와 RecurDyn Pre-post 및 기본적 모델링 방법 숙지	RecurDyn을 이용한 응용모델링 방법에 대한 이해 및 실습

Chapter 1. Introduction

Lecture:

MBD 운동방정식 구성과정 및 RecurDyn의 Body와 Joint 및 Force에 대한 역학적, 물리적, 수학적 의미를 익힌다.

Workshop:

동역학 예제에 대한 RecurDyn 모델을 Open하여 해석 수행 후 Animation과 Post process의 Plot 기능을 통해 결과를 확인한다.



소요 시간

강의명	시간(분)
MBD Introduction	45 분
Workshop	15 분



1. 다물체 동역학이란

여러 개의 강체가 힘과 Joint 연결상태에 의한 역학적 거동을 분석하는 해석기술로서 다물체계(MBD system)에 대한 운동방정식을 구성하고 이를 시간에 대한 적분을 통해 물체의 위치와 속도 그리고 가속도 및 작용하중을 계산한다. Figure 1은 다물체계를 모델링하고 해석하는 과정을 간략히 나타낸 그림으로서 슬라이드 크랭크 모델에 대한 예제이다.

그 과정은 그림과 같이 다물체계를 구성하는 물체와 joint 그리고 힘을 정의한 후 Assembly하여 운동방정식을 만들고 이를 시간적분을 통해 동역학적 거동을 수치해석적으로 계산한다.

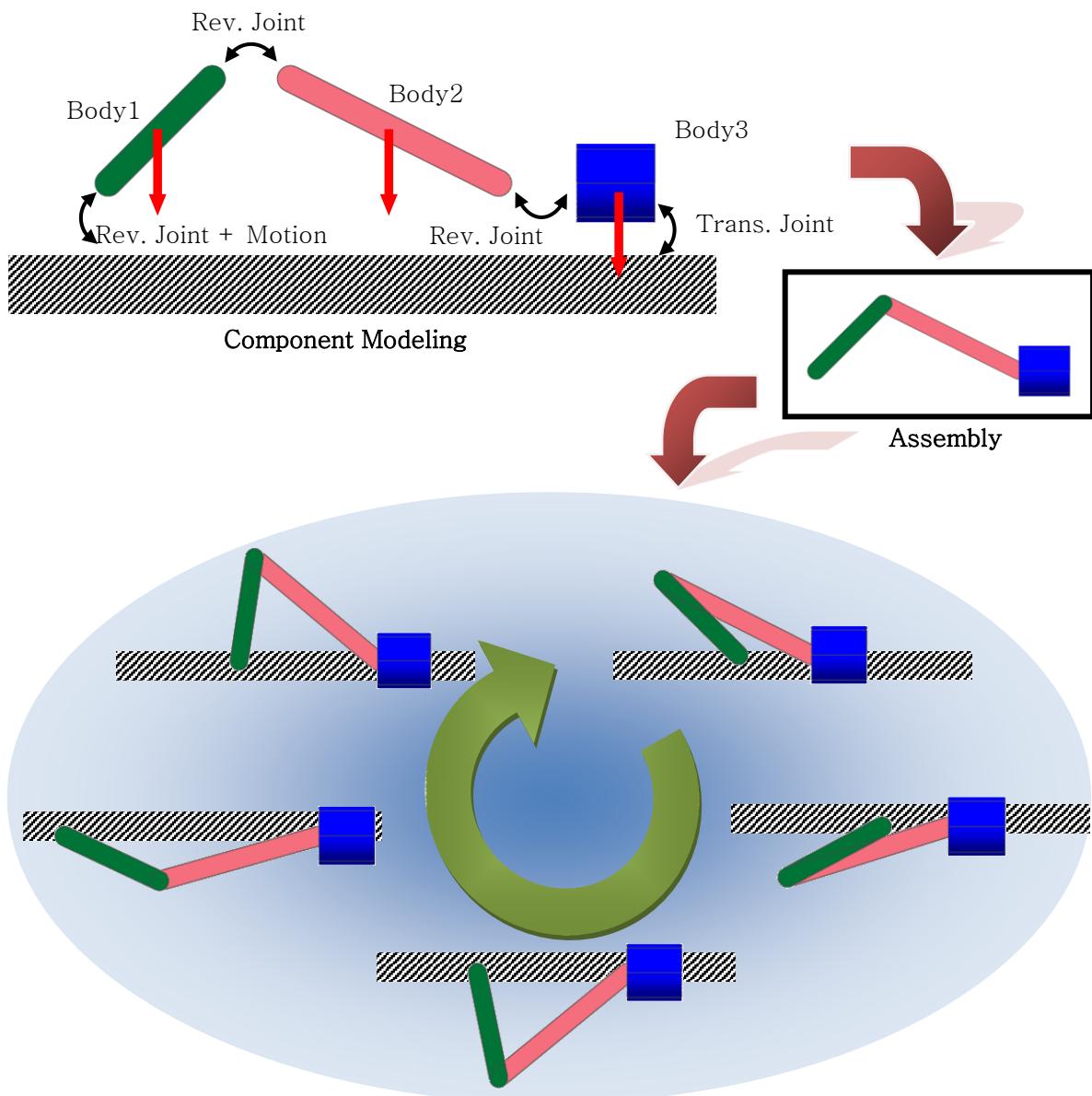


Figure 1 다물체 동역학 해석

2. 동역학의 기본요소

1) 좌표계(coordinate system)

물체의 운동을 정의하기 위한 방향 벡터를 나타내기 위한 기준으로서 물체의 위치와 자세 및 속도와 가속도 등을 좌표계를 통해 나타낼 수 있다. 수학적으로 보면 좌표란 각 방향에 대해 모두 독립적인 물리량을 의미하며 하나의 운동방정식에서 사용하는 좌표는 모두 동일한 좌표계를 기준으로 구성해야 한다.

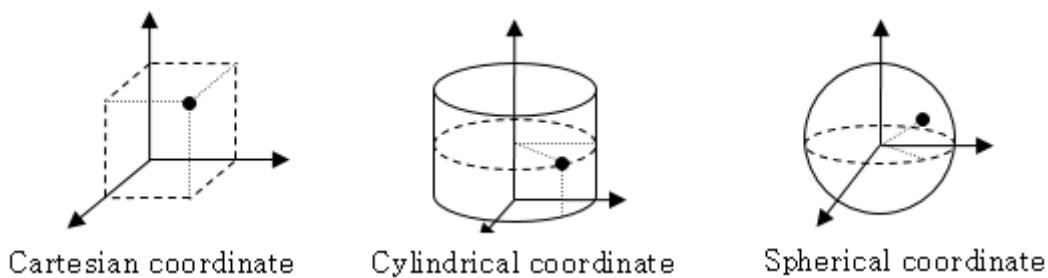


Figure 2 다양한 좌표계의 형태

2) 강체의 위치(location)

물체가 가지는 고유의 좌표를 의미하며 좌표계와 원점으로부터 각 방향까지의 거리를 수치정보를 통해 표현한다. 물체의 위치를 표현하는 방법으로는 절대 좌표(absolute coordinate) 표현법과 지역 좌표(local coordinate)에 의한 표현법이 있다. 절대 좌표에 의한 표현은 모든 좌표의 기준을 Global원점에 대해 나타내는 방법이며 지역 좌표 표현법은 절대 좌표로부터 기준 좌표계를 정의하고 다시 기준 좌표로부터 물체까지의 좌표를 나타내는 방법이다

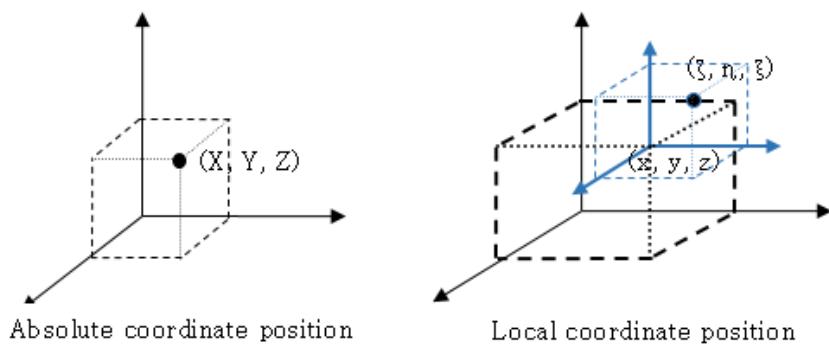


Figure 3 강체의 위치 표현

그 외에도 강체의 자유도를 기준으로 운동방정식을 표현할 수 있는 상대 좌표계(relative coordinate)를 사용하기도 한다. 상대 좌표계의 표현 방법은 해당 물체의 위치

와 각도를 기준 물체로부터 자유도에 따라 부여한다.

3) 강체의 자세(Orientation)

물체가 공간상에 회전되어 있는 자세를 의미하며 직교 좌표계에서는 각 축방향에 대해 특정 순서대로 회전한 상태를 나타낸다. 물체의 자세를 나타내는 가장 일반적인 방법은 Bryant angle법이며 이 방법은 x-y-z축 순서로 회전한다. 수학적으로 보다 많이 사용되는 방법은 z-x-z축 순서인 Euler angle법이다. 기본적으로 RecurDyn의 orientation정의 방법은 Euler angle법이다.

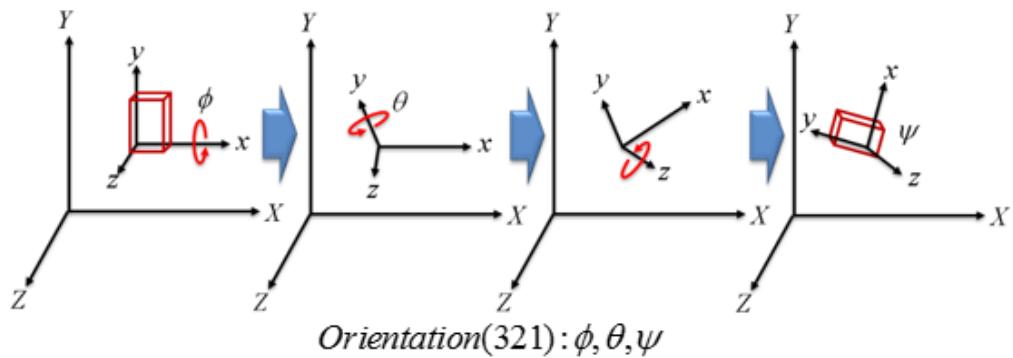


Figure 4 강체의 자세 (orientation)

4) 강체의 질량(mass)

물체가 가지는 가장 기본적인 물리량으로서 병진방향의 힘에 대해 가속도 발생을 저해시키는 역할을 한다. 쉽게 말해 질량은 힘에 대한 가속도의 저항이다. 또한 질량은 에너지 저장체이다. 즉, 힘을 받아 속도가 발생한 물체는 다른 외력이 존재하지 않는 한 속도를 유지한다. 이러한 물리량을 운동에너지라고 하며 그 크기는 질량에 비례하고 속도의 제곱에 비례한다. 힘을 주어 속도를 발생시킨 물체는 질량과 속도만큼의 에너지를 유지하게 된다.

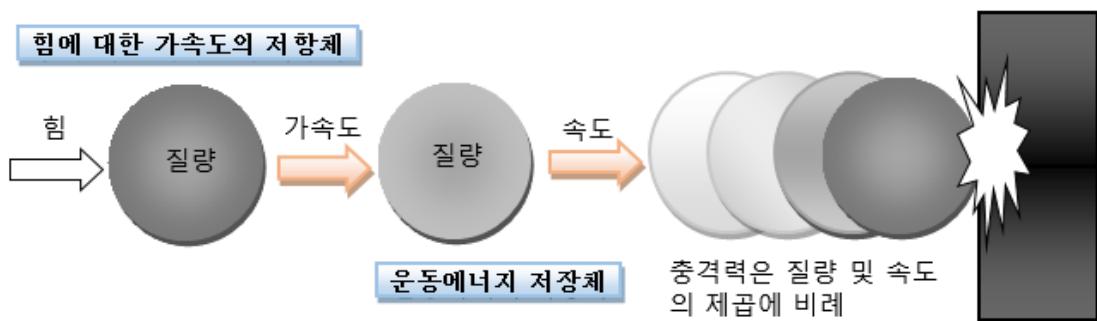


Figure 5 질량의 물리적 의미

5) 강체의 관성모멘트(moment of inertia)

질량이 병진방향에 대한 저항이라면 관성모멘트는 회전에 대해 각가속도 발생을 저항하는 역할을 한다. 즉, 회전토크에 대한 저항이다. 질량과 동일한 개념으로 회전방향에 대한 에너지 보존체 역할을 한다. 회전에 대한 운동에너지는 관성모멘트에 비례하고 각속도의 제곱에 비례한다.

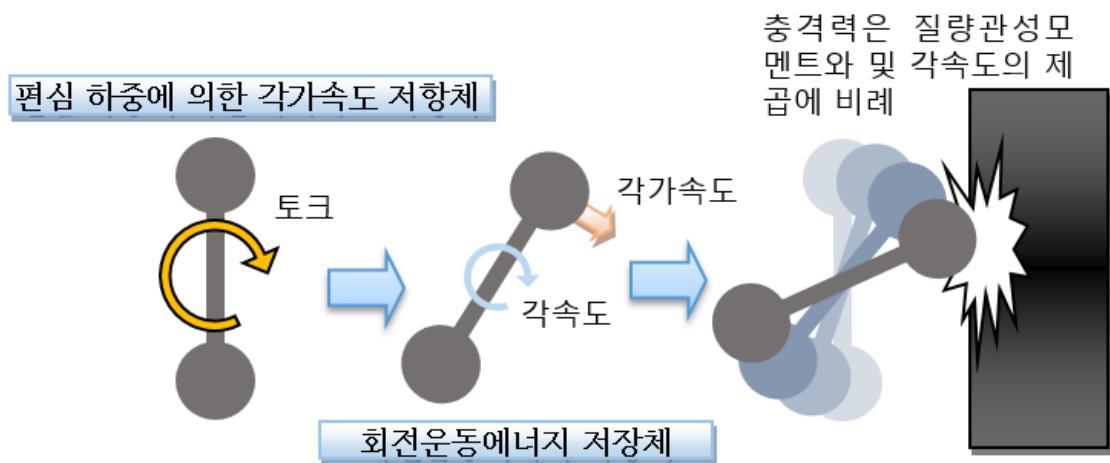


Figure 6 관성모멘트의 물리적 의미

6) 자유도(degree of freedom)

물체가 가지는 고유의 물리적 상태를 자유도라 하며, 이 자유도는 각각 직교(독립적)하여야 한다. 운동학적 자유도는 물체의 속도를 나타내는 각 방향을 의미하며 특정방향으로 움직일 수 없을 때 자유도가 구속되었다고 표현한다. 질점은 x, y, z 세 방향으로 움직일 수 있으므로 3자유도가 되며 강체는 3방향의 병진과 3방향의 회전이 포함되어 모두 6자유도를 가진다.

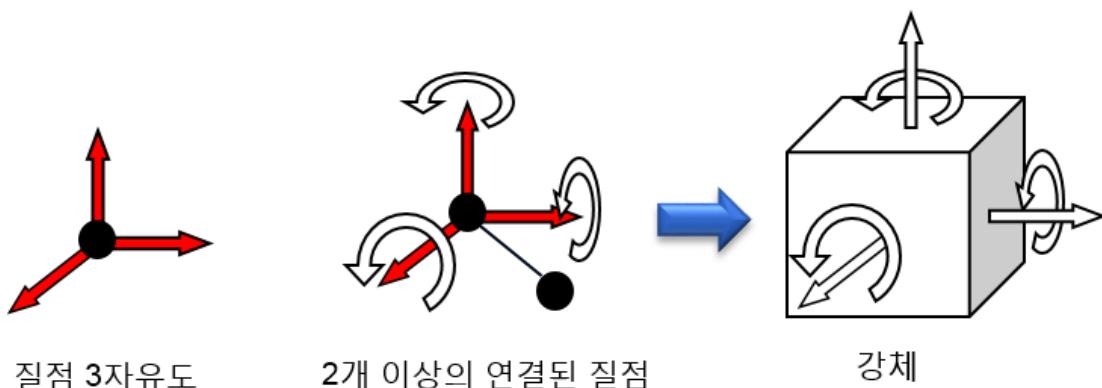


Figure 7 질점과 강체의 자유도

7) 강체(rigid body)

형태의 변형이 발생하지 않으며 질량 및 그 분포가 변하지 않는 물체, 또한 강체는 병진 3방향과 회전 3방향의 자유도만 가진다. 강체는 이론적으로만 존재하며 실제 세계에서 강체는 존재하지 않는다. 그러나 변형이 매우 미소하다고 볼 때 강체로 가정하고 그 역학관계를 풀이할 수 있다. 강체는 수학적으로 정의하기 용이하다.

그림과 같이 강체는 기준 좌표로부터 R벡터의 위치와 자세를 가지며 강체 내부의 기준 좌표로부터 미소질량 dm 까지의 거리벡터 \vec{r} 은 항상 일정하다.

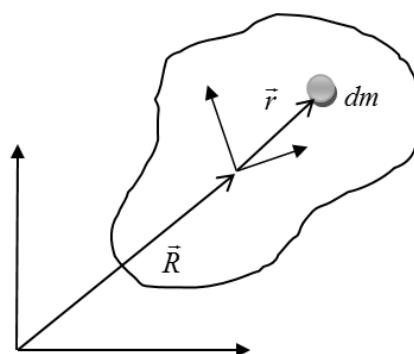


Figure 8 강체의 의미

8) 힘(force)

외부에서 물체에 작용하는 물리량 중 가속도를 발생시키는 요소로서 벡터형태로 가해지며, 반드시 두 물체에 작용과 반작용으로서 역학을 한다. 즉, 한 물체에만 가해지는 힘이란 물리적으로 존재하지 않는다. 그러나 수학적으로 반작용의 대상이 지구와 같이 무한대에 가까운 질량체라고 가정하면 하나의 물체에 힘이 가해진다고 가정할 수 있다.



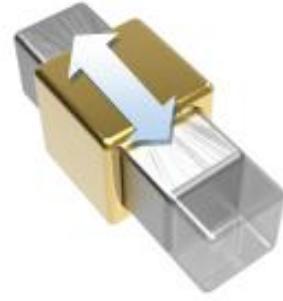
Figure 9 여러 가지 힘 요소의 종류

9) 조인트(joint)

두 물체 사이의 자유도를 제거하는 연결관계로서 수학적으로 정의되는 관계식이다. joint는 다양한 형태가 있으며 이를 운동방정식과 함께 구성하고 수학적으로 정의하여 미분대수 방정식을 수치해석적으로 풀이한다.



회전조인트



병진조인트



구면조인트



유니버설조인트



실린더조인트



평판조인트

Figure 10 다양한 Joint

3. 뉴턴 동역학

뉴턴 제 2법칙(질량과 힘의 운동에 대한 관계식: $F = ma$)을 사용하여 물체의 운동을 해석하는 방법이며, 힘과 가속도에 대한 식을 기본으로 하여 자유물체도(free body diagram)을 구성한 후, 방정식을 풀이 하는 방법

Example 1) 평판 위를 구르는 금속 허프가 3m 거리를 이동 하였을 때의 시간과 각속도를 구하라

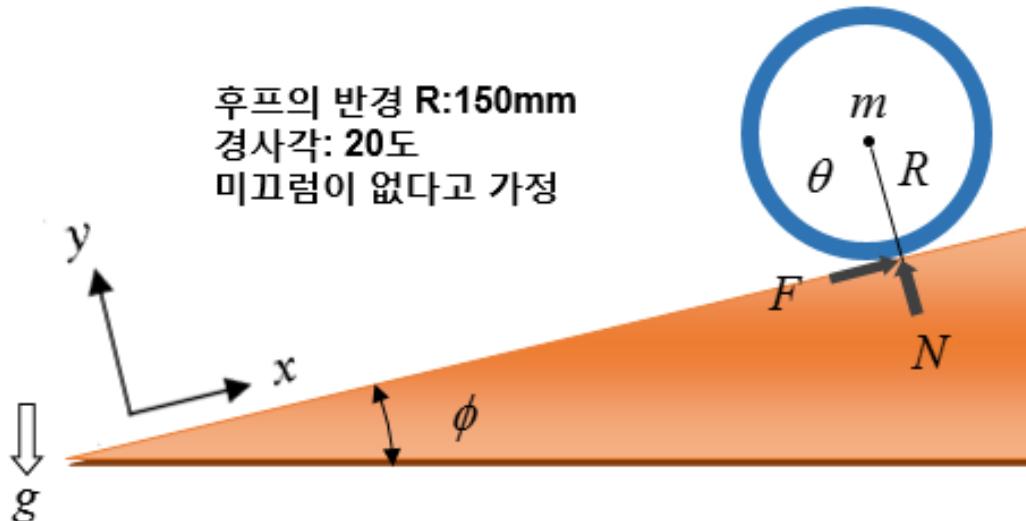


Figure 11 구르는 링 예제

<Step 1> 자유물체도를 이용한 정적 상태방정식의 나열

1) x방향 힘에 대한 평형방정식

$$\sum F_x = F - mg \sin 20^\circ = m\ddot{x}$$

2) y방향 힘에 대한 평형방정식

$$\sum F_y = N - mg \cos 20^\circ = m\ddot{y}$$

3) Z축에 대한 모멘트 평형방정식

$$\sum M_z = FR = I\ddot{\theta} \left(I = \int_0^{2\pi} \frac{m}{2\pi} R^2 d\theta = mR^2 \right) \Rightarrow FR = mR^2\ddot{\theta}$$

4) 해를 구하기 위한 가정(후프와 지면은 미끄러지지 않음)

$$-\ddot{x} = R\ddot{\theta}$$

<Step 2> 관계식을 이용한 방정식 유도

5) 식3)으로부터 다음 식 유도

$$FR = mR^2\ddot{\theta} \Rightarrow \ddot{\theta} = \frac{F}{mR}$$

6) 식4)에 식5)를 대입하여 다음 식 유도

$$\ddot{x} = -R\ddot{\theta} \Rightarrow \ddot{x} = -R \frac{F}{mR} = -\frac{F}{m}$$

7) 식1)에 식6)을 대입하여 아래와 같이 유도

$$F - mg \sin 20^\circ = -m\ddot{x} \Rightarrow F - mg \sin 20^\circ = -F \Rightarrow 2F = mg \sin 20^\circ$$

$$\therefore F = \frac{1}{2}mg \sin 20^\circ$$

<Step 3> 방정식을 이용하여 해를 유도

8) 식7)을 식1)에 대입하여 해를 계산

$$\frac{1}{2}mg \sin 20^\circ - mg \sin 20^\circ = m\ddot{x} \Rightarrow \ddot{x} = -\frac{1}{2}g \sin 20^\circ$$

9) 가속도 속도 및 위치에 대한 기본적인 미분방정식을 이용

$$\text{Acceleration: } \ddot{x} \quad \text{Velocity: } \dot{x} = \ddot{x}t + C_1 \quad \text{Position: } x = \frac{1}{2}\ddot{x}t^2 + C_1t + C_2$$

$$t = 0, \quad \dot{x}, x = 0 \quad \therefore C_1, C_2 = 0$$

10) 식8)을 식9)에 대입하면 x 에 대한 t 의 수식을 유도할 수 있으며, 아래의 식과 같음

$$t = \sqrt{\frac{2x}{\ddot{x}}} = \sqrt{\frac{4x}{-g \sin 20^\circ}} \quad (x, \ddot{x} < 0)$$

x 가 3일 때 t 는 1.8921초

뉴턴 역학을 이용한 문제 풀이의 한계

- 자유물체도를 도시하여 물체의 역학관계를 정의해야만 풀이 가능
- 힘의 작용 방향에 대해 오류가 발생하면 오답 발생
- 가정 없이 문제를 풀 수 없는 경우가 대부분
- 생성한 방정식을 대수방정식으로 풀이

4. 라그랑지(Lagrange) 동역학

라그랑지 동역학은 에너지보존법칙으로부터 유도되는 동역학 운동방정식 구성방법이다. 이 방법은 운동에너지와 위치에너지에 대한 방정식을 라그랑지 방정식(Lagrange equation)에 대입하여 매우 효율적인 방법으로 운동방정식을 유도한다. 기존의 Newton역학이 힘의 평형방정식으로부터 모든 운동방정식을 유도하는 것과 달리 에너지 방정식으로부터 시작하기 때문에 많은 수의 물체가 존재하는 다물체계에 대해 매우 빠르고 쉽게 운동방정식을 유도할 수 있다.

- 라그랑지 함수: $L = T(\text{운동에너지}) - V(\text{위치에너지})$

$$\bullet \text{ 라그랑지 방정식: } \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = Q$$

Example) 2자유도 스프링 시스템에 대한 운동방정식 유도

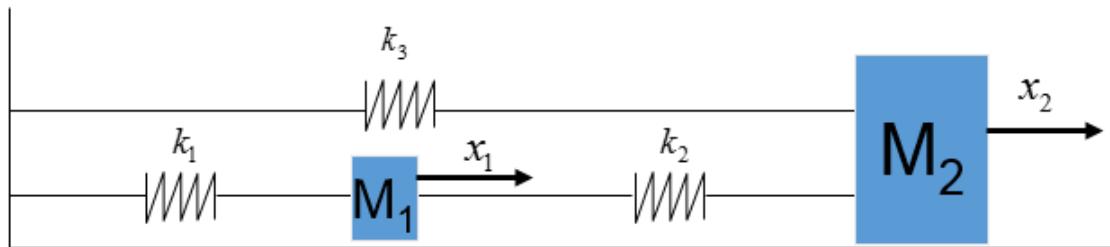


Figure 12 2자유도 스프링 시스템 예제

<STEP1> 시스템의 에너지 방정식 유도

1) 운동에너지 방정식 정립

$$T = \frac{1}{2} m_1 \dot{x}_1^2 + \frac{1}{2} m_2 \dot{x}_2^2$$

2) 위치에너지 방정식 정립

$$V = \frac{1}{2} k_1 x_1^2 + \frac{1}{2} k_2 (x_2 - x_1)^2 + \frac{1}{2} k_3 x_2^2$$

<STEP2> 라그랑지 운동방정식 유도

3) 라그랑지 함수 구성 및 라그랑지 방정식 대입

$$L = T - V$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}_1} \right) - \frac{\partial L}{\partial x_1} = Q_{x1} \Rightarrow \frac{d}{dt} (m_1 \dot{x}_1) + k_1 x_1 - k_2 (x_2 - x_1) = Q_{x1}$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}_2} \right) - \frac{\partial L}{\partial x_2} = Q_{x2} \Rightarrow \frac{d}{dt} (m_2 \dot{x}_2) + k_3 x_2 + k_2 (x_2 - x_1) = Q_{x2}$$

4) 편미분 수행 및 운동방정식 정리

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 + k_1 x_1 - k_2 (x_2 - x_1) = Q_{x1} \\ m_2 \ddot{x}_2 + k_3 x_2 + k_2 (x_2 - x_1) = Q_{x2} \end{cases}$$

<STEP3> 추출된 운동방정식을 MATRIX형태로 표현 및 수치해석 수행

$$\begin{bmatrix} m_1 & \\ & m_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{x1} \\ Q_{x2} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_3 + k_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$$

라그랑지 방정식을 이용한 운동방정식 유도의 장점

- 물체의 에너지 방정식을 이용하여 쉽게 운동방정식 유도
- 힘의 작용 방향을 고려하지 않아도 됨
- 에너지 방정식은 제곱 항이 있으므로 부호에 대한 혼돈의 우려 없음
- 생성한 방정식을 수치해석에 그대로 활용 가능
- 여러 물체가 존재하는 다물체시스템에 대해 적용하기 쉬움

5. 구속 방정식(constraint equation)

다물체 시스템은 강체와 힘 요소뿐만 아니라 joint와 같은 구속이 존재한다. 구속방정식은 두 물체 사이에 자유도를 수학적인 관계식을 만들어 이를 만족하는 조건에서 운동방정식이 풀리도록 한다. 이러한 구속식은 다양한 형태로 존재하며 그 형태에 따라 여러 가지 joint로 명명된다.

Example) 원 위를 움직이는 링에 대한 운동방정식 유도

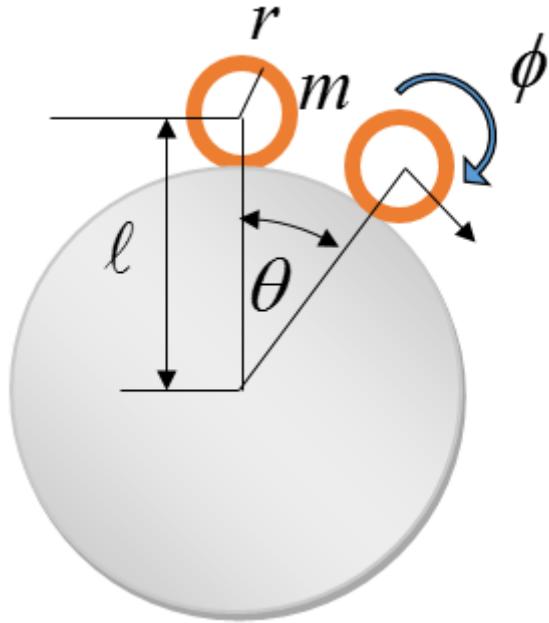


Figure 13 원 위를 구르는 예제

STEP1) 시스템의 자유도 정의: ℓ, θ, ϕ

STEP2) 에너지 방정식 구성:

$$1) \text{ 운동에너지: } T = \frac{1}{2}m(\ell\dot{\theta})^2 + \frac{1}{2}m\dot{\ell}^2 + \frac{1}{2}I\dot{\phi}^2$$

$$2) \text{ 위치에너지: } V = mg\ell \cos \theta$$

STEP3) 구속방정식 정의

3) 링은 구면에서 이탈하지 않는다.

$$f_1 = \dot{\ell} = 0 \Rightarrow \ell = \text{constant}$$

4) 링과 구면은 미끄러지지 않는다.

$$f_2 = l\dot{\theta} - r\dot{\phi} = 0$$

STEP4) 구속식에 따른 Lagrange Multiplier 구성

$$\begin{cases} \dot{l} = 0 \\ l\dot{\theta} - r\dot{\phi} = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} a_{l1}\dot{l} + a_{\theta 1}\dot{\theta} + a_{\phi 1}\dot{\phi} = 0 \quad (a_{l1} = 1, a_{\theta 1} = 0, a_{\phi 1} = 0) \\ a_{l2}\dot{l} + a_{\theta 2}\dot{\theta} + a_{\phi 2}\dot{\phi} = 0 \quad (a_{l2} = 0, a_{\theta 2} = l, a_{\phi 2} = -r) \end{cases}$$

STEP5) Lagrange Multiplier를 운동방정식에 대입

$$f(\theta): \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} \right) - \left(\frac{\partial L}{\partial \theta} \right) = 2mll\dot{\theta} + ml^2\ddot{\theta} + mgl \sin \theta = a_{\theta 1}\lambda_1 + a_{\theta 2}\lambda_2 = l\lambda_2$$

$$f(\phi): \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\phi}} \right) - \left(\frac{\partial L}{\partial \phi} \right) = mr^2\ddot{\phi} = a_{\phi 1}\lambda_1 + a_{\phi 2}\lambda_2 = -r\lambda_2$$

$$f(l): \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{l}} \right) - \left(\frac{\partial L}{\partial l} \right) = m\ddot{l} - ml\dot{\theta}^2 - mg \cos \theta = a_{l1}\lambda_1 + a_{l2}\lambda_2 = \lambda_1$$

STEP6) 전체 운동방정식 정리 및 풀이

$$2mll\dot{\theta} + ml^2\ddot{\theta} + mgl \sin \theta = l\lambda_2$$

$$mr^2\dot{\phi} = -r\lambda_2$$

$$m\ddot{l} - ml\dot{\theta}^2 - mg \cos \theta = \lambda_1$$

$$\dot{l} = 0$$

$$l\dot{\theta} - r\dot{\phi}$$

$$\Rightarrow \begin{bmatrix} ml^2 & . & . & . \\ . & mr^2 & . & . \\ . & . & m & -1 \\ . & . & -1 & . \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \ddot{\phi} \\ \ddot{l} \\ \lambda_1 \\ \lambda_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2mll\dot{\theta} + mgl \sin \theta \\ 0 \\ ml\dot{\theta}^2 + mg \cos \theta \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

다물체동역학에서 사용되는 미분대수 방정식의 일반형태

$$\Rightarrow \begin{bmatrix} M & \Phi_q^T \\ \Phi_q & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q \\ \gamma \end{bmatrix}$$

여기서 λ 는 구속을 만족시키기 위해 수학적으로 필요한 값으로서 물리적으로 보면 구속식을 유지하기 위한 힘에 해당한다

λ_1 : 링이 구면을 벗어나지 않기 위해 필요한 힘

λ_2 : 링이 구면을 미끄러지지 않기 위해 필요한 힘

구속방정식은 Joint 종류별로 미리 구성되어 있는 구속방정식을 사용할 수 있으며, 이러한 자동구성방정식을 통해 일반화된 동역학 모델의 운동방정식을 구성할 수 있다. 다물체 동역학 해석 프로그램의 사용자는 이러한 구속방정식의 형태나 운동방정식을 직접 구성할 필요 없이 필요한 구성요소를 나열하고 필요한 정보만 입력하면 동역학 운동방정식을 구성하고 풀이할 수 있다.

구속방정식에 의해 계산되는 λ 는 수학적으로 필요한 값이기도 하지만 역학적으로 볼 때 구속을 유지하기 위한 힘이므로 매우 중요한 계산결과이다.

6. RecurDyn Entity(Body, Joint, Force)와 운동방정식

다물체 동역학 해석 프로그램인 RecurDyn은 지금까지 다루어 왔던 운동방정식을 구성하고 풀이하는 기능을 가지고 있다. 따라서 RecurDyn에서 사용하는 여러 요소(Entity)는 이러한 운동방정식의 각 요소와 대응된다.

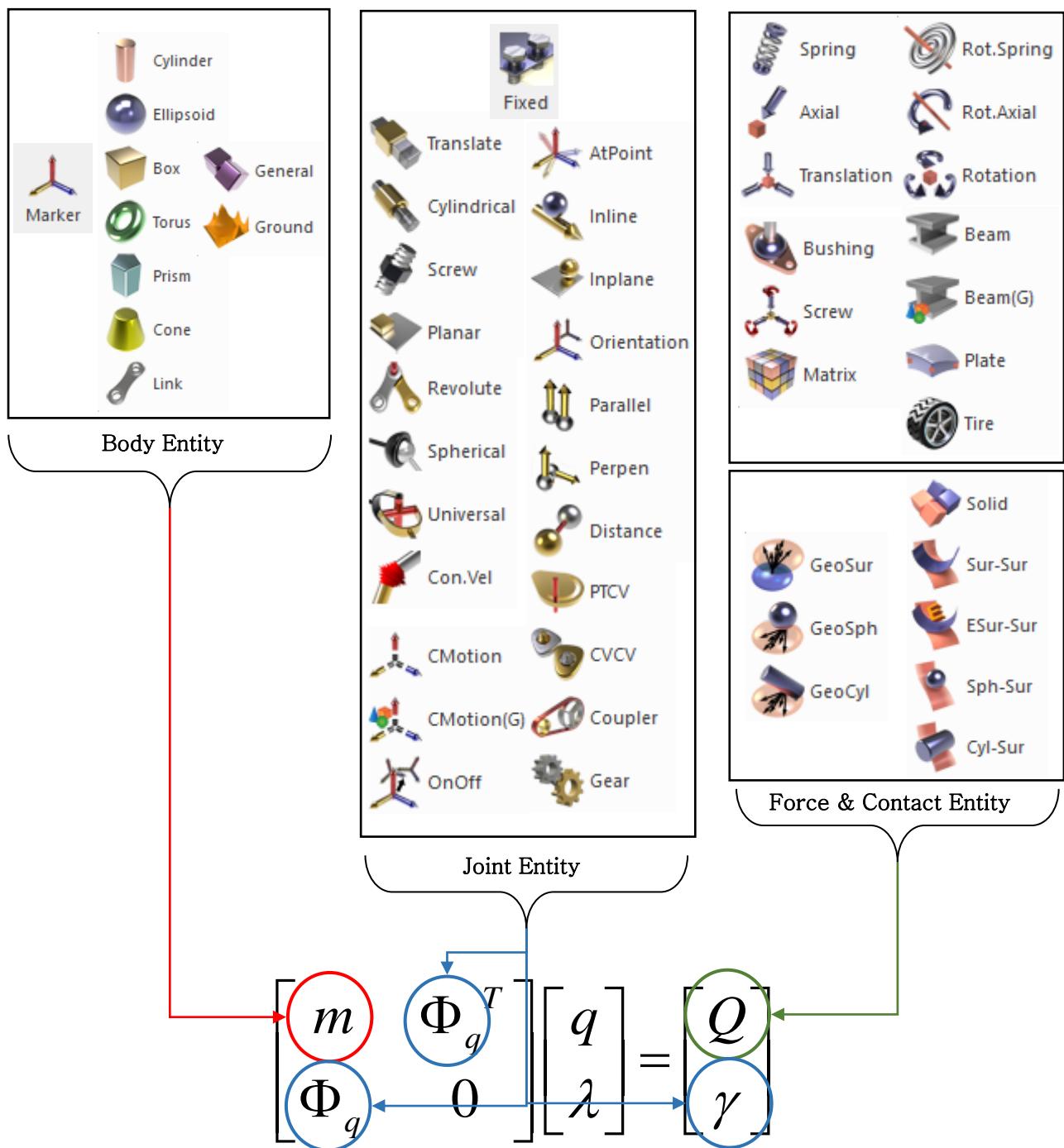


Figure 14 RecurDyn 요소와 운동방정식의 관계

Workshop 1 Rolling Ring

내용: 1장의 강의에서 뉴턴 동역학의 설명 중 예제로 제시된 구르는 링 모델을 RecurDyn으로 구현한 모델파일을 불러들여 해석을 수행한 후, 그 결과가 해석적으로 구한 결과와 일치하는지 확인한다.

본 워크샵을 통해 아래의 관련 기능을 익힐 수 있다

- RecurDyn 실행 및 모델파일 열기
- 모델링 화면의 조종
- 해석 수행 및 Scope를 이용한 결과 확인
- 다물체 동역학의 이해 및 검증

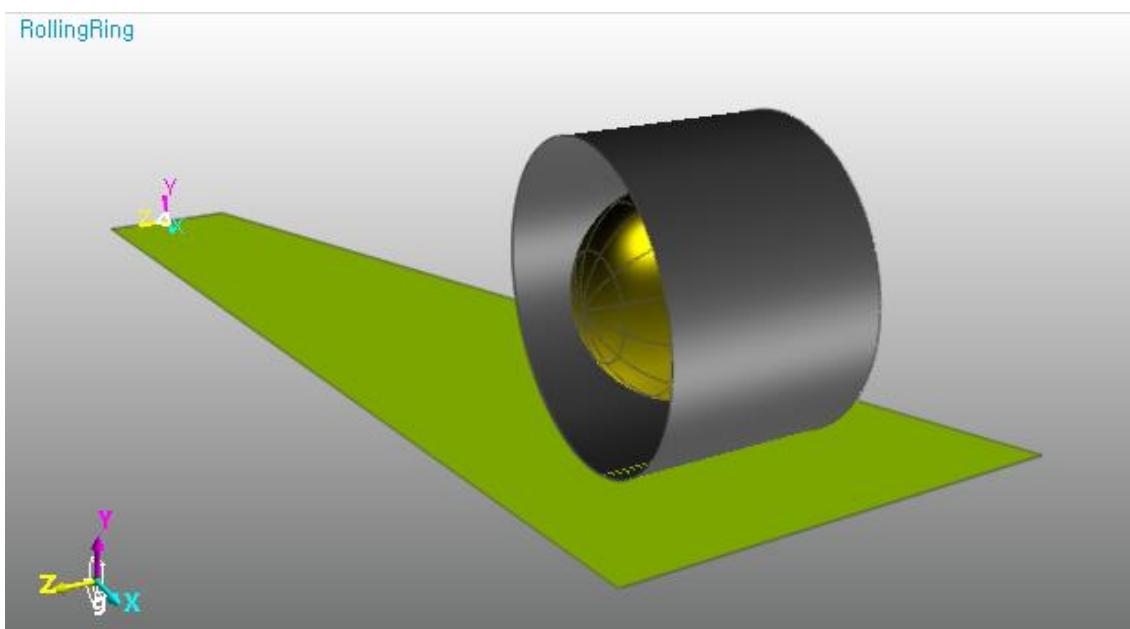


Figure 15 Workshop1 구르는 링 모델

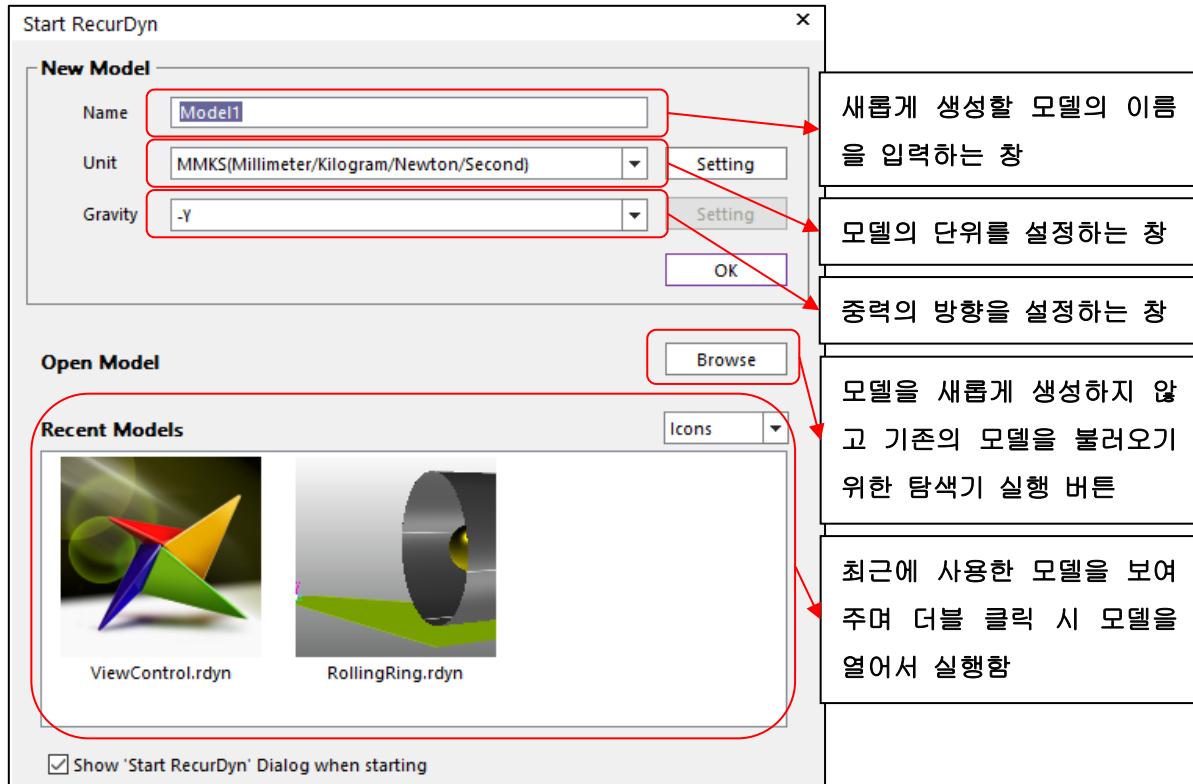
수행시간	20분
난이도 Level	1

Workshop 수행을 위해 필요한 사항

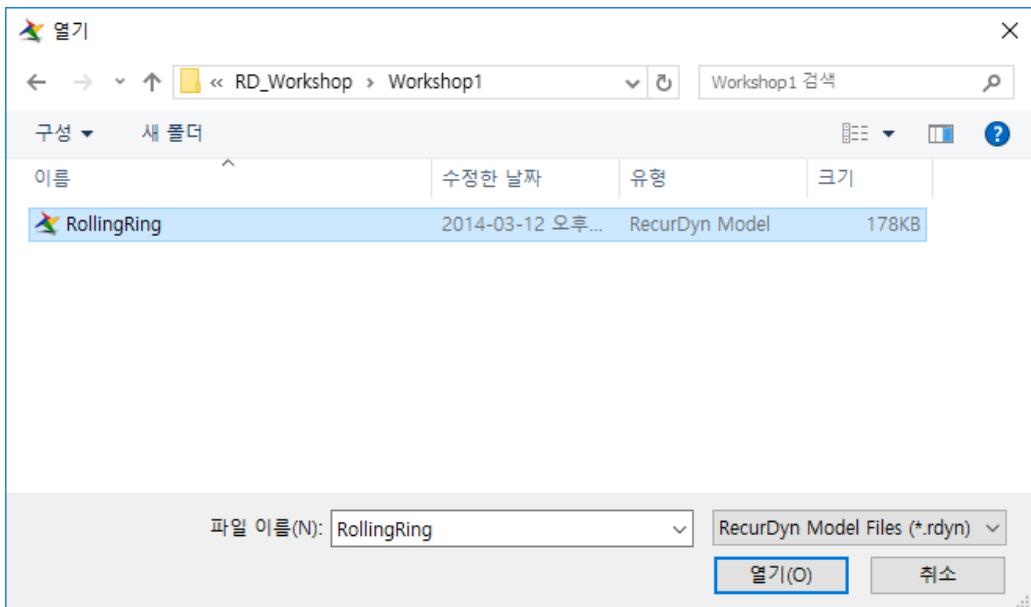
- RecurDyn V9R1 이상 설치
- Professional 교육자료 Workshop Data Files
- MS Windows의 기본적 사용법

STEP 1 RecurDyn 실행

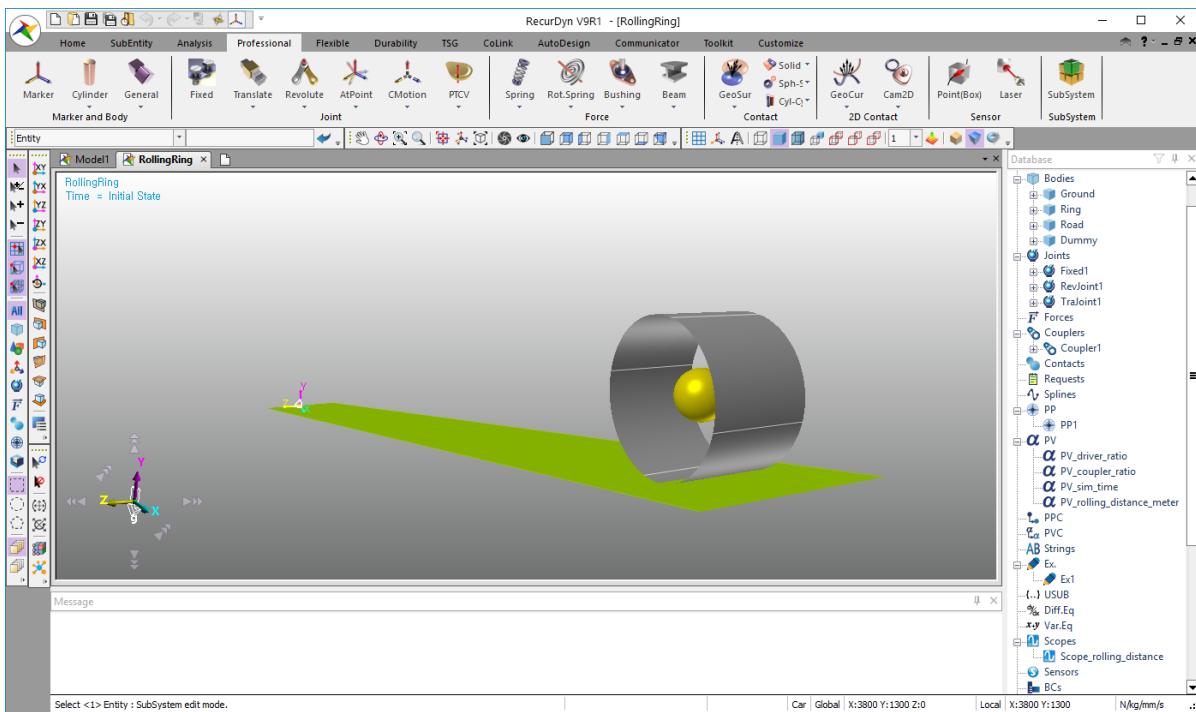
1. Window의 시작메뉴에서 → 모든프로그램 → FunctionBay, Inc → RecurDyn V9R1 → RecurDyn V9R1 실행



2. Browse 버튼을 누른다



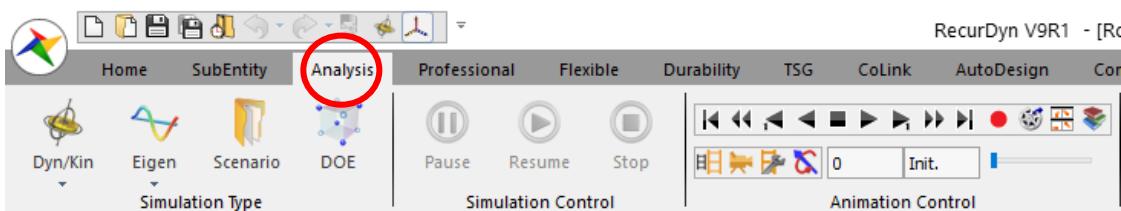
3. Workshop1 폴더의 RollingRing.rdyn을 선택 후 열기 버튼을 누른다.



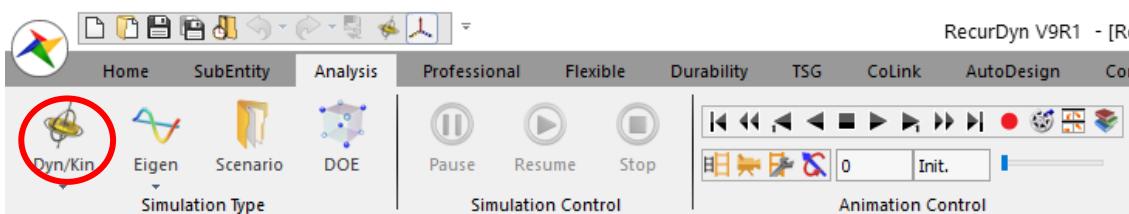
4. 실행된 RecurDyn과 불려진 RollingRing.rdyn모델의 모습을 확인할 수 있다. 모델을 열기 위해 반드시 위와 같이 탐색기를 사용해야 하는 것은 아니다. Windows탐색기에서 모델파일을 더블클릭하거나 파일을 Drag하여 RecurDyn프로그램에 Drop하여도 정상적으로 열린다.

STEP 2 시뮬레이션 수행

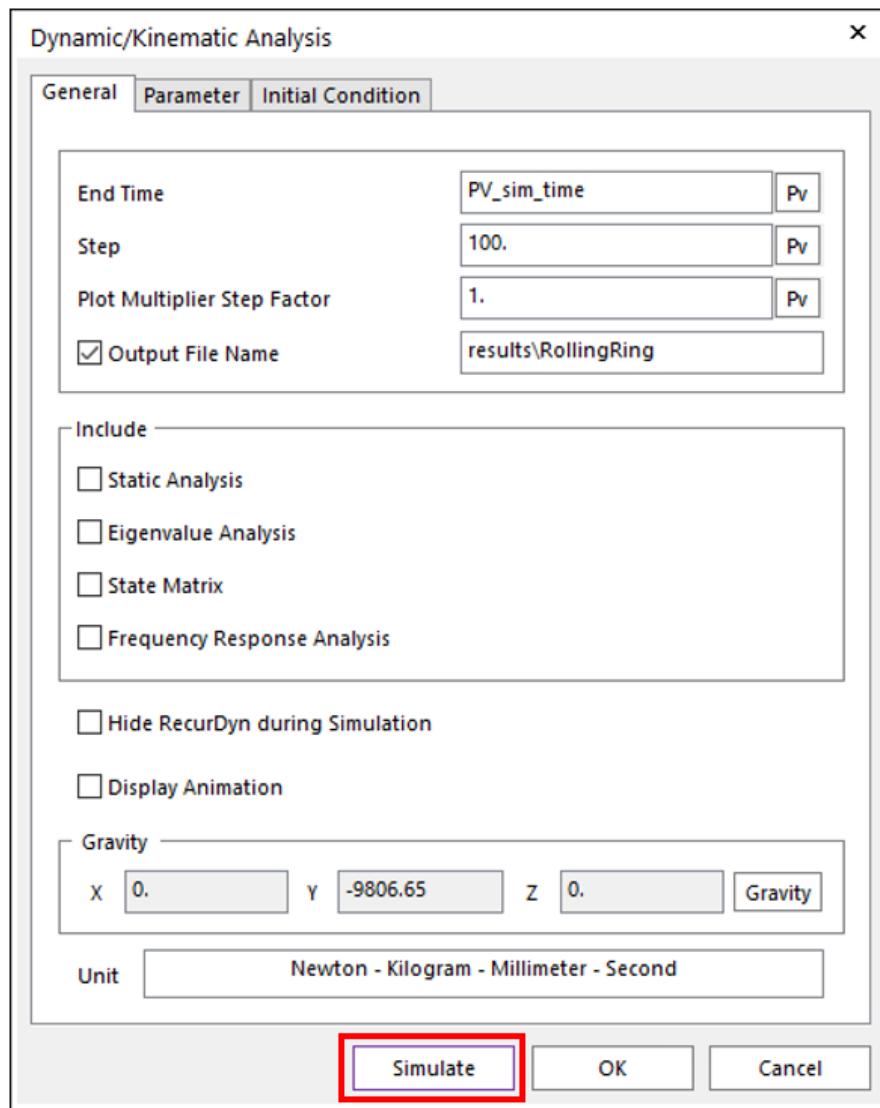
1. Analysis Tab을 누른다.



2. Dyn/Kin버튼을 누른다



3. Dynamic/Kinematic Analysis창이 뜨면 Simulate버튼을 누른다



Message Windows에 해석 상황에 대한 메시지와 해석 상태바가 표시되며 최종적으로 시뮬레이션 완료되었음을 알리는 메시지가 뜬다

Message

Analysis processing...

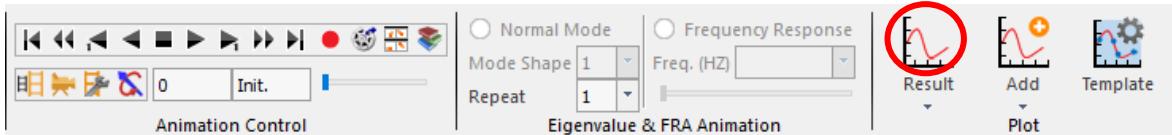
TIME	STEPSIZE	A_DELNRM	NJAC	NRES	ANRF	AINTF
6.133000E-03	5.120000E-04	4.209644E-17	100	300	0	0
6.302130E-01	1.000000E-02	4.610561E-14	199	597	0	0
1.620213E+00	1.000000E-02	1.093888E-14	298	894	0	0
1.891492E+00	1.278713E-03	3.312758E-14	326	978	0	0

Message

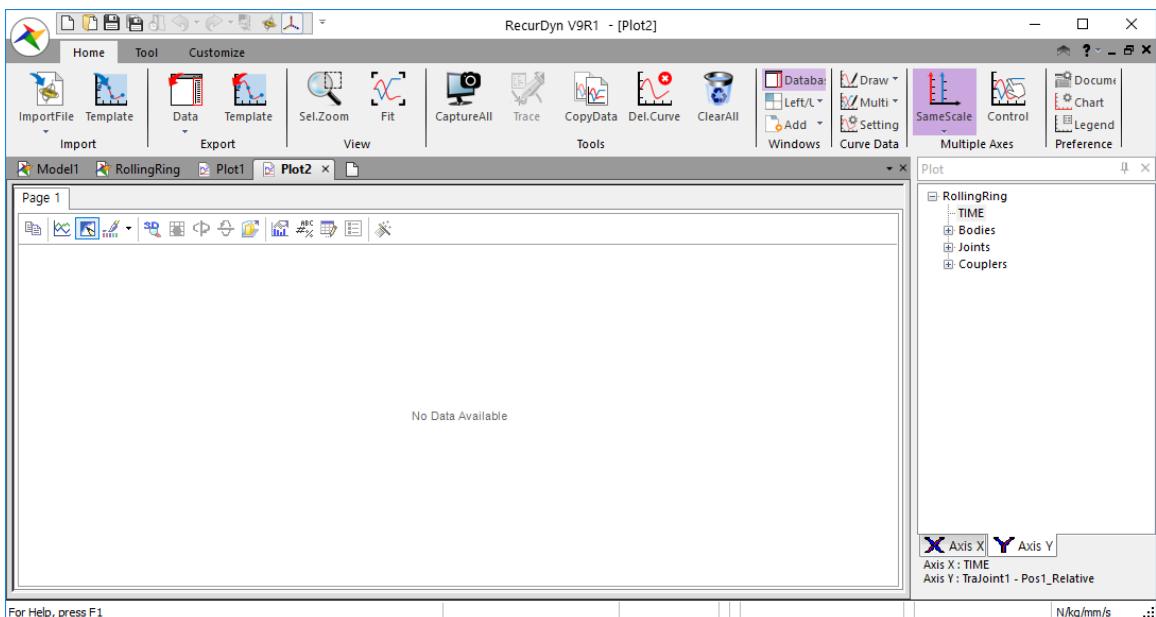
Analysis is accomplished successfully

STEP 3 해석 결과 Plot 및 검토

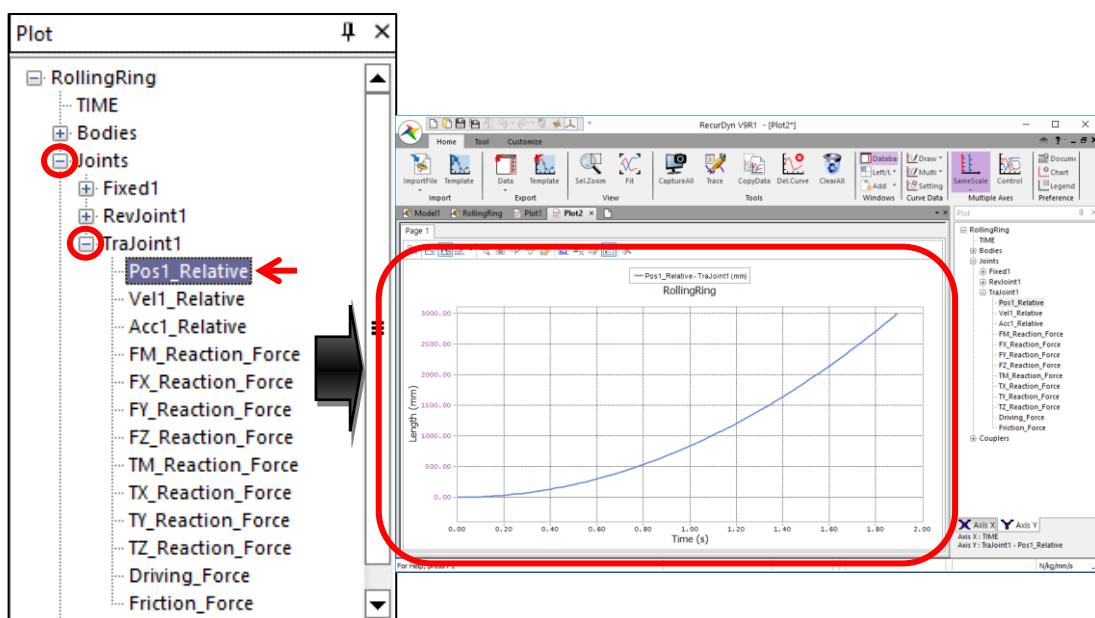
1. Analysis Tab의 Plot_Result버튼을 누른다



Plot버튼을 누르면 Post-process창으로 변환된다



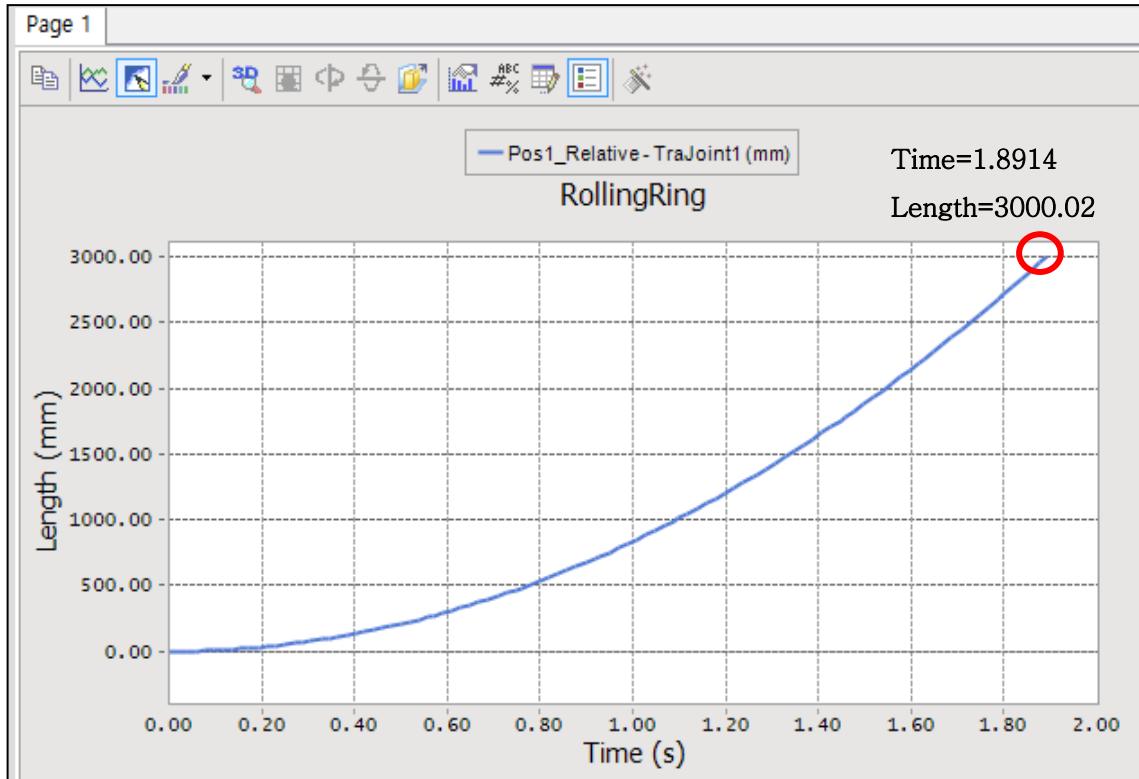
2. Plot Data창에서 Joints→ TraJoint1→Pos1_Relative를 순서대로 누른 후 Pos1_Relative를 더블 클릭한다



plot data창에서 그래프를 그리기 원하는 데이터를 더블클릭하면 Plot창에 그래프가 그려진다.

본 모델은 Chapter 1의 구르는 링 모델을 RecurDyn으로 구성한 것이다. Workshop을 통해

해석하고 그린 그래프는 Ring이 병진방향으로 움직인 거리이다. 이론적 계산식에서 3m를 진행하기 위해 필요한 시간은 1.8921초이며 이 모델을 해석한 시간이기도 하다. 그래프와 같이 링은 1.8921초 동안 3000mm 움직인 것을 확인 할 수 있다



Workshop1에서는 RecurDyn을 실행시키고 이미 만들어진 RecurDyn모델을 불러오고 해석을 수행하는 과정을 따라하기 형태로 익힌다. 그 과정에서 미리 만들어진 RecurDyn모델(구르는 링)을 열어 해석을 수행하고 해석결과를 그래프로 그려 보았다. 그리고 그래프를 확인하여 해석된 결과가 이론적으로 계산한 결과와 잘 일치하는 것을 확인하였다. 보다 자세한 사용법 및 모델링 방법은 앞으로 진행되는 Lecture 및 Workshop을 통해 익히게 된다.

Chapter 2. Pre-processor Interface

Lecture:

GUI환경, DB구조, 각종 Basic Entity(Body, Joint, Force, Contact) 소개 Working Window화면 Control

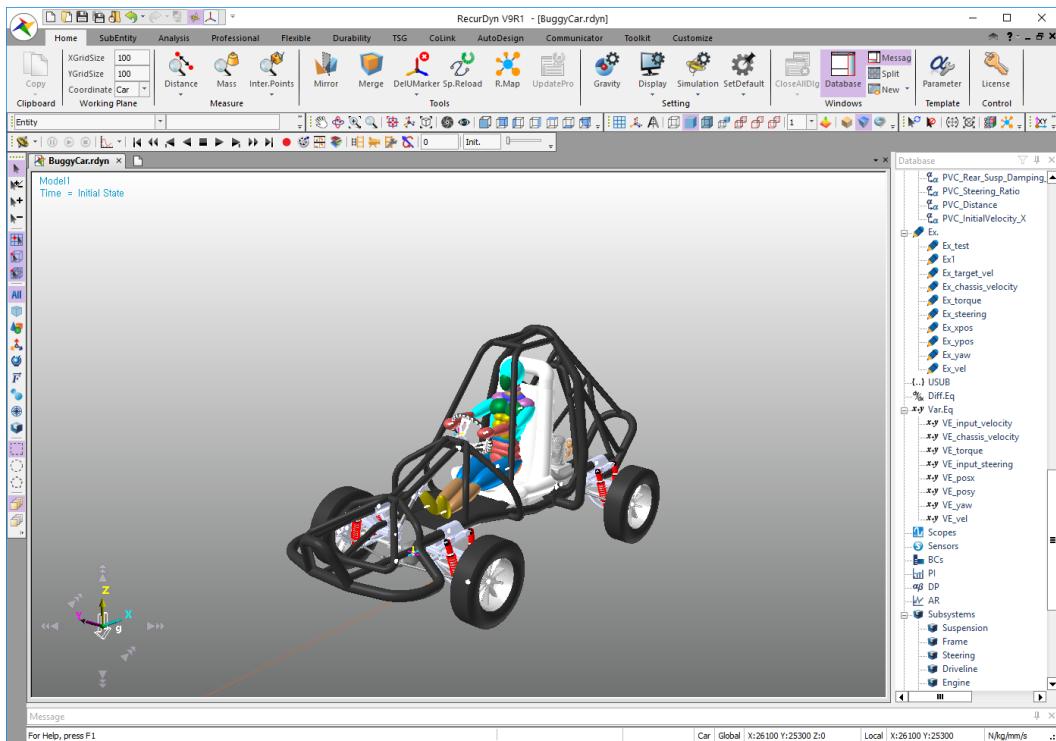
Workshop:

예제를 불러들여 Body, Joint, Force, Contact를 각각 하나씩 생성하는 과정+ Solving



소요 시간

강의명	시간(분)
RecurDyn Overview1	30 분
Workshop	30 분
총합	60 분



1. RecurDyn의 Preprocessor 기본화면

RecurDyn의 기본메뉴는 리본메뉴 스타일로서 직관적이고 빠른 작업을 가능하게 한다. 뿐만 아니라 Database Window를 통해 쉽게 모델의 구성을 파악할 수 있으며, 빠른 처리 속도를 나타내는 GUI로 구성되어 MBD모델링에 최적의 성능을 발휘한다.

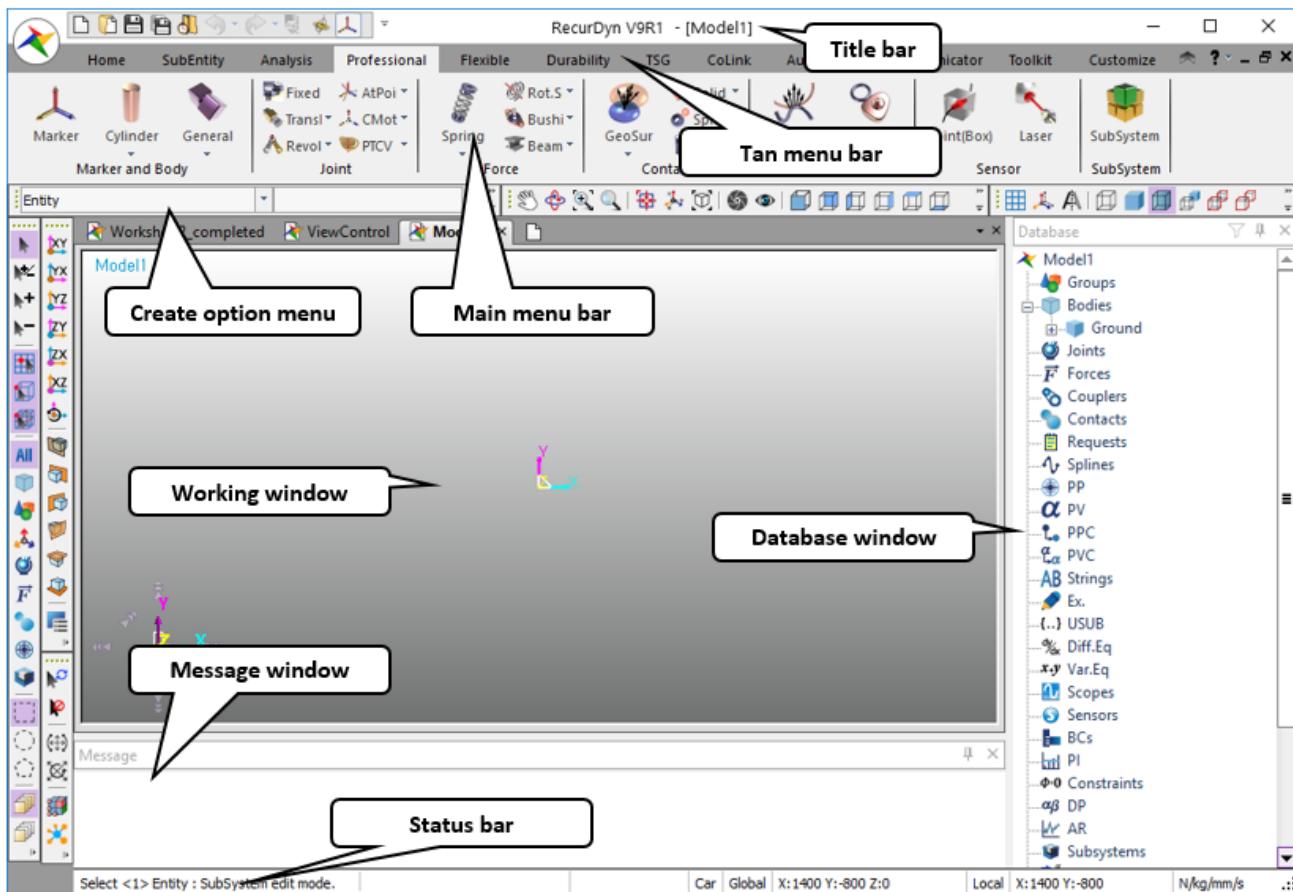


Figure 16 RecurDyn Pre-processor GUI

- Title Bar: RecurDyn Version 및 작업중인 모델의 파일 이름이 출력
- Tab Menu Bar: 각종 대 분류의 Menu를 Tab 형태로 이동하는 메뉴
- Menu Bar: 선택된 Tab Menu에 해당하는 구체적인 메뉴
- Create Option Menu: 각 버튼을 이용하여 Entity 생성시 옵션을 선택하거나 좌표를 직접 Key in
- View Control Bar: 화면의 View상태 및 Icon과 Object 이동 및 Object Graphic설정과 관련된 메뉴
- Database Window: Modeling Entity를 Tree구조로 나타내주며 Entity Handling을 수행
- Working Window: 모델을 직접 눈으로 관찰하며 Entity Handling을 수행
- Message Window: 모델링 과정 및 해석 프로세스에 대한 Message를 출력
- Status Bar: 모델링 과정 중 해야 할 작업 순서 또는 Help에 대한 내용 출력

2. Working window

RecurDyn의 작업 창(Working Window)은 3차원 CAD 데이터 모델을 화면에 표시하여 모델의 전체적인 형태를 관찰할 수 있는 중요한 창이다. 이 창을 조종하는 기능은 매우 기초적이지만 중요한 기술이다.

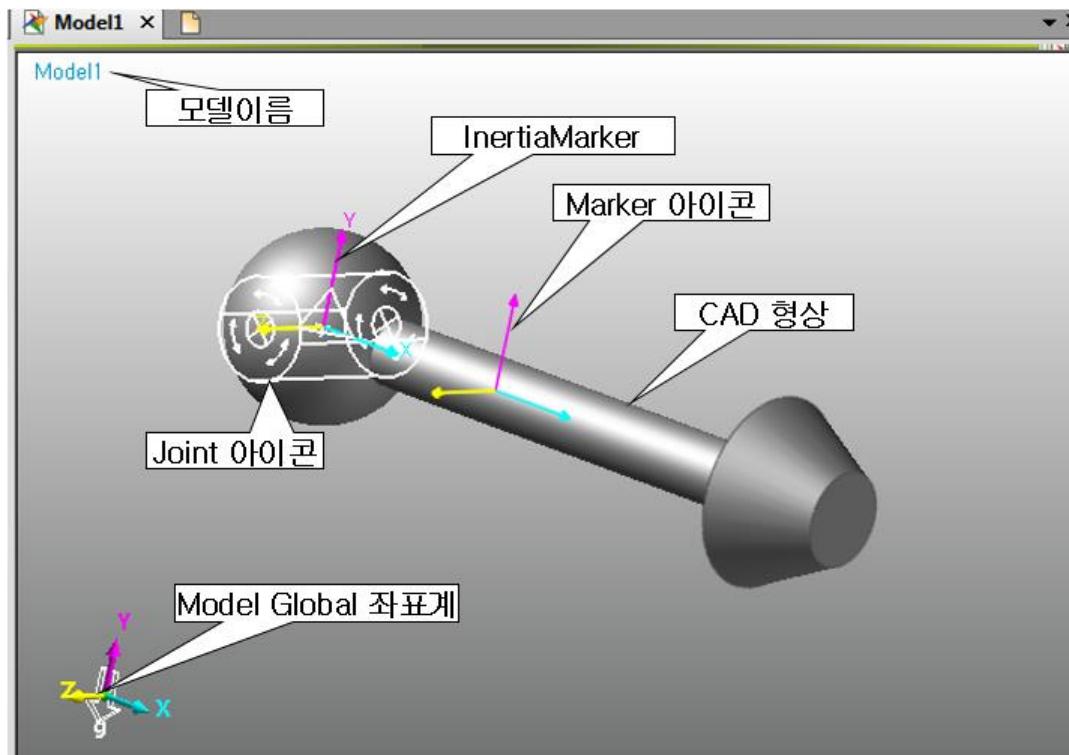


Figure 17 Working window

- 모델이름: 모델이 가지는 고유의 이름이며 파일명과는 다르다.
- 아이콘: 여러 가지 모델링 요소를 Working Window에 표시하는 간략화된 형상
- Model 좌표계: 모델이 가지는 가장 기본이 되는 좌표계의 방향을 나타내며 중력이 있는 경우 중력에 대한 아이콘이 함께 표시됨
- InertiaMarker: 모델의 기준을 나타내는 Marker로서 지울 수 없는 고유의 Marker이다. 이 Marker는 항상 원점(0,0,0)에 Model 좌표계와 동일한 자세로 정의된다. RecurDyn에서는 독립적으로 모델링과 해석을 할 수 있는 Subsystem을 Model 하위에 정의할 수 있으며 이 Subsystem은 독립된 고유의 Database를 가진다. 따라서 Subsystem에도 고유의 InertiaMarker가 있다.
- CAD형상: CAD file로부터 읽어 들여지거나 자체적으로 생성된 3차원 Geometry 형상

3. Working Window의 View control

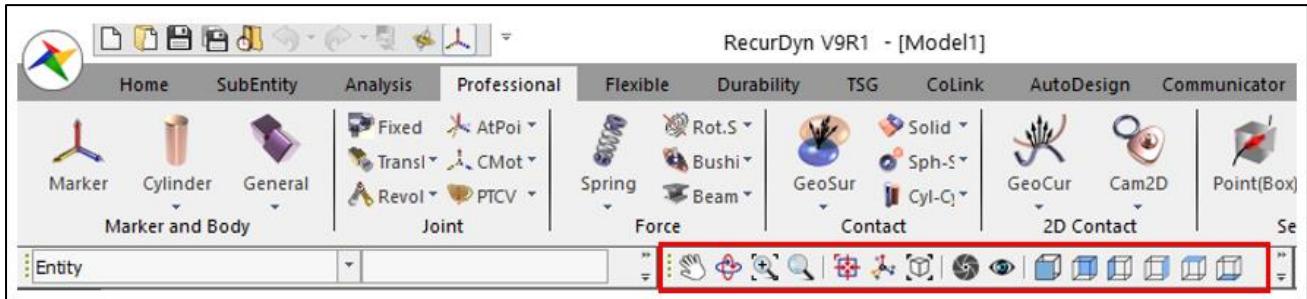


Figure 18 Working Window view control menu

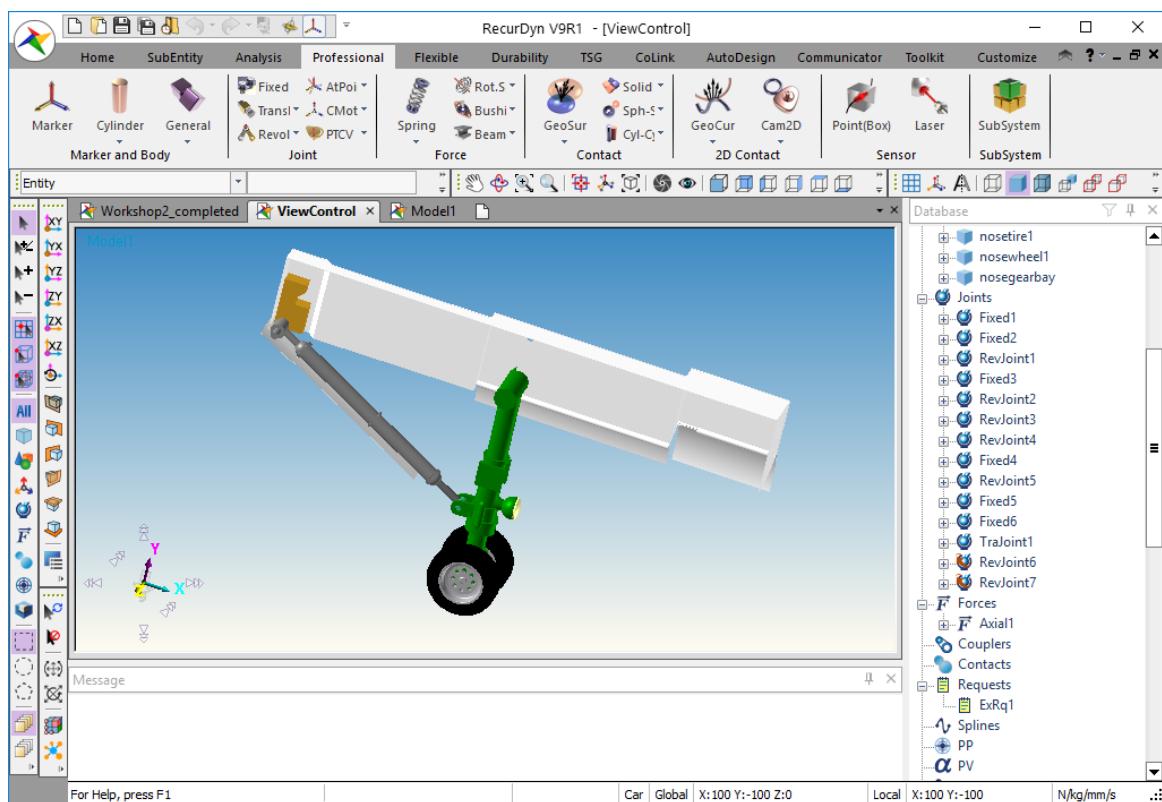
화면을 제어하는 기능은 모든 3차원 모델링 프로그램에서 가장 기본적인 기능이며 반드시 자유자재로 사용할 수 있도록 숙지해야 한다. 기본적인 화면 제어는 다음과 같다.

아이콘	명령	설 명	단축키
	Translation	화면을 좌우 아래위로 움직이는 기능으로서 아이콘을 클릭하고 마우스 왼쪽 버튼을 누른 상태에서 움직이면 원하는 방향으로 이동	T
	Rotation	화면을 좌우 아래위로 회전시키는 기능으로서 아이콘을 클릭하고 마우스 왼쪽 버튼을 누른 상태에서 움직이면 원하는 방향으로 회전	R
	Fit	화면에 모델이 가득 차 보이도록 맞추는 기능으로서 아이콘을 클릭하면 수행됨. CAD Geometry의 형상뿐만 아니라 Icon도 대상에 포함	F
	View Snap	화면을 X-Y 또는 Y-Z평면과 같이 특정한 축을 화면에 수직하게 보이도록 하는 기능으로서 아이콘을 클릭하면 바로 수행	
	Center	Rotation 기능과 관련된 기능으로 회전의 중심을 설정하는 기능으로서 아이콘을 클릭하고 원하는 점을 선택하면 수행.	C
	Box Zoom	원하는 영역의 Box구간을 확대(zoom)하는 기능이다. 아이콘을 클릭하고 원하는 구간을 Drag하면 확대 기능이 수행.	S
	Shade	Working Window의 모든 3차원 형상이 Shade된 상태로 보이도록 하는 기능으로서 아이콘을 누르면 해당 상태로 변경됨	
	Wireframe	Working Window의 모든 3차원 형상이 Wireframe된 상태로 보이도록 하는 기능으로서 아이콘을 누르면 해당 상태로 변경	
	Shade with Wire	Working Window의 모든 3차원 형상이 Shade with Wire된 상태로 보이도록 하는 기능으로서 아이콘을 누르면 해당 상	

		태로 변경	
	Each Render	각 Body의 개별적인 Render 설정에 따라 화면에 나타내도록 설정하는 기능으로서 아이콘을 누르면 해당 상태로 변경	

RecurDyn의 기본적인 View Control은 Working Window에서 Translate('T'), Rotate('R'), Fit('F'), Center('C'), Box Zoom('S') 및 마우스를 이용한 화면 조정이다 기본적인 단축키인 R,T,Z,S,C 는 숙지하여 이용하는 것이 바람직하다. 본장의 Workshop을 진행하기에 앞서 Workshop2 폴더에 있는 ViewControl.rdyn파일을 열어 나타나는 모델을 보면서 View Control기능을 숙지해 본다.

< ViewControl.rdyn >



'T' + 마우스 왼쪽버튼 Click + 이동

'R' + 마우스 왼쪽버튼 Click + 이동

'C' + 원하는 위치로 마우스 이동 후 왼쪽버튼 Click

'S' + 마우스 왼쪽버튼 Click + 원하는 범위를 Drag

'F'

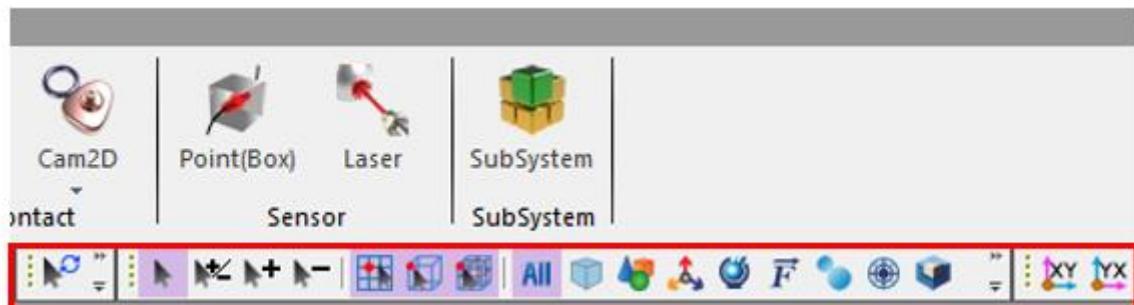


Figure 19 Grid and Icon control menu

아이콘	명령	설 명	단축키
	View Change	Working Window의 Normal Plane을 기준으로 화면을 전후 좌우 상하로 보이도록 설정	
	Name On/Off	Working Window에 Body, Marker Joint의 이름을 표시할 것인지 결정	
	Icon Control	어떤 Icon을 화면에 표시할 것인지 설정	
	Grid On/Off	Grid의 표시를 화면에 나타낼 것인지를 설정	
	Snap to Grid	Point선택시 Grid에 snap되는 magnetic효과를 사용할 것인지를 설정	
	Working Plane Change	Working Plane을 현재 설정상태에서 전후, 좌우, 상하 평면으로 바꾸는 기능	
	Working Plane Change(Axis)	Working Plane을 Global xy, yz, xz 평면으로 변경하는 기능	
	Rotate Working Plane	Working Plane을 현재 설정상태에서 화면에 수직인 축을 중심으로 회전시키는 기능	
	Working Plane Setup	Working Plane을 사용자 임의 상태로 변경하는 기능	
	Auto Operation	Body나 Joint Force등의 Entity 생성을 반복적으로 수행할 때 Check on	
	Basic Object Control	Working window의 선택된 Entity를 이동시키거나 회전시키는 Object Control Dbox를 여는 기능	
	Advanced Object	Working window의 선택된 Entity를 이동시키거나 회전시키는 Advanced Object Control Dbox를 여는 기능	

	Control		
	Working Layer	Body, Joint, force 등을 Working Window에 표시할 때 Layer를 선택하는 기능	
	Layer Filter	원하는 Layer만 보거나 전체 Layer의 Entity를 보이도록 설정하는 기능	
	Ortho	화면의 물체를 원근감 없이 표현하는 설정	
	Perspective	화면의 물체를 원근감이 있도록 표현하는 설정	

4. Professional Tab

1) Body Entity

Body는 동역학의 기본요소 중 질량체(mass & inertia)를 의미하며, 메뉴의 Icon과 동일한 형상(Geometry)의 Body가 Working Window에 생성된다. Body는 데이터베이스 원도우에 Bodies group에 등록된다.

생성된 Body의 주요 입력 값은 질량과 관성모멘트 그리고 관성질량중심(CM) Marker의 위치 및 Body의 초기 속도 정보이다.

Body는 시스템이 가지는 가장 기본적인 요소이며 모델은 최소 1개의 Body를 가지고 있어야 해석 가능하다

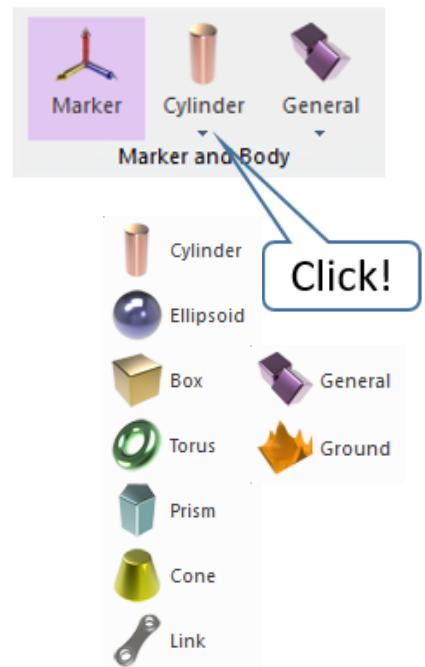


Figure 20 Body entity

※ C1 : first click, C2 : second click

아이콘	Name	설명	기본 생성방법
	Marker	Body에 종속되는 참조 좌표이며 위치와 자세를 가짐. Joint와 Force를 생성할 때 필요한 위치 및 자세정보로 사용	C1: 소속될 Body C2: 위치
	Ellipsoid	구형상의 Body 생성	C1: 중심위치 C2: 반경까지의 위치
	Cylinder	실린더 형상의 Body 생성	C1: 한쪽 끝 원의 중심 C2: 반대쪽 끝 원의 중심
	Box	육면체 형상의 Body 생성	C1: 한쪽 모서리의 위치 C2: 대각 모서리의 위치
	Torus	도너츠 형상의 Body 생성	C1: 도너츠 형상의 중심 C2: 반경까지의 위치
	Prism	정 다각형 기둥 형상의 Body 생성	C1: 한쪽 다각형 중심 C2: 반대쪽 다각형 중심
	Cone	양쪽원의 반경이 다른 실린더 형상의 Body 생성	C1: 한쪽 끝 원의 중심 C2: 반대쪽 끝 원의 중심
	Link	양쪽 끝부분이 실린더 형태이며 가운데는 육면체 형상인 Body를 생성	C1: 한쪽 끝 원의 중심 C2: 반대쪽 끝 원의 중심

	General	사용자가 직접 형상을 입력하기 위한 형태가 없는 Body를 생성	C1: Body의 기준위치 →Body Edit Mode로 전환
	Ground	Ground에 형상을 입력하고자 할 때 사용	Ground Body Edit Mode로 전환.

2) Joint Entity

Joint는 동역학의 기본요소 중 구속(Constraint)관계를 의미하며, 아이콘의 그림과 동일한 형태의 구속관계를 만들어낸다. 예를 들어 Fixed Joint의 경우 2개의 Bolt로 체결된 형태의 아이콘이며 이는 두 물체 사이에 자유도를 완전히 구속하는 것을 의미한다. Revolute Joint의 경우 특정 축 방향의 회전만 가능한 joint이며 이러한 관계가 아이콘으로 잘 나타나 있다. Joint의 종류로는 크게 General, Primitive, Special로 나뉘며 General의 경우 실제로 존재하는 기계요소 형태의 joint이며 Primitive의 경우 특정방향의 자유도만 구속되는 이론적인 joint를 나타낸다. Primitive Joint의 경우 과구속을 제거하거나 Body의 Heading방향을 항상 수직으로 두고자 하는 것과 같이 이론적인 구속을 부여할 때 사용된다. 그리고 Special은 Joint와 Joint 사이의 구속식 또는 Curve to Curve와 같이 특수한 형태의 joint를 의미한다.

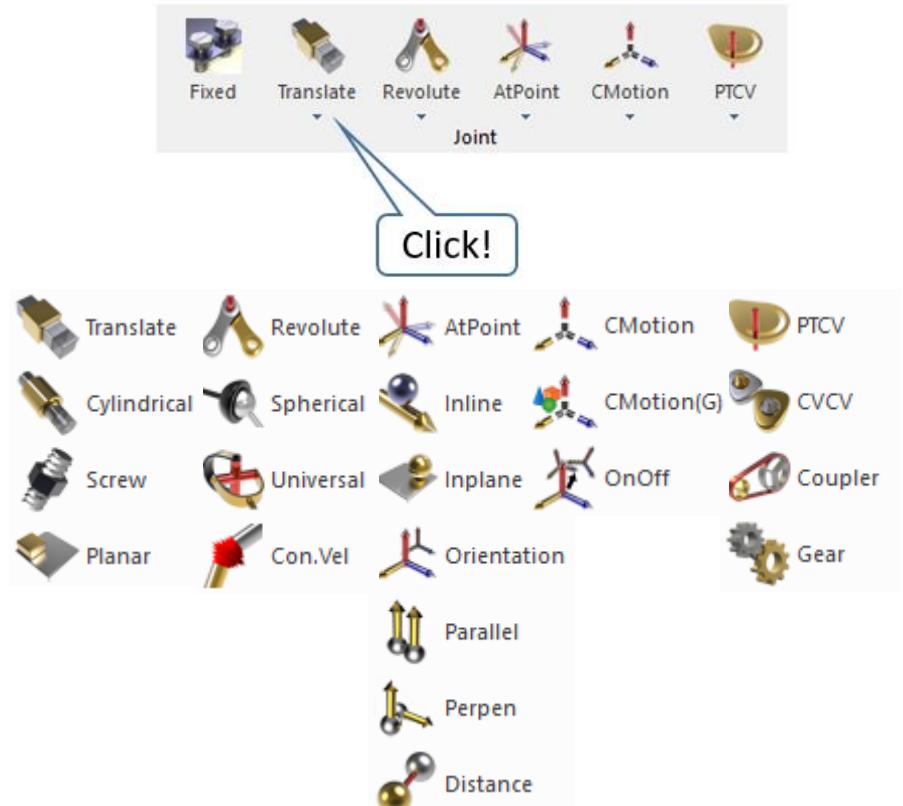


Figure 21 Joint entity

3) Force Entity

Force는 동역학의 기본요소 중 외력(force)을 의미하며, Body와 Body사이에 작용하는 힘을 구현하는데 사용된다. 메뉴의 Icon과 동일한 형태의 힘 요소가 Working Window에 생성된다. 대표적으로 스프링은 두 물체 사이에 인장 또는 압축력을 발생시키는 힘 요소이며, Bushing은 두 물체 사이에 작용하는 6분력을 모두 강성과 감쇠 모델로 구현한 것이다. Axial 또는 Trans. Force는 각 방향의 힘을 사용자가 직접 정의하여 사용한다. Special Entity는 두 Body 사이의 강성행렬(6x6)을 직접 정의하여 계산하는 요소이며, Beam 또는 Plate는 이 강성 행렬을 Beam요소 또는 Plate의 FEM(finite element method)의 강성행렬과 유사한 형태로 입력한 모델이다.

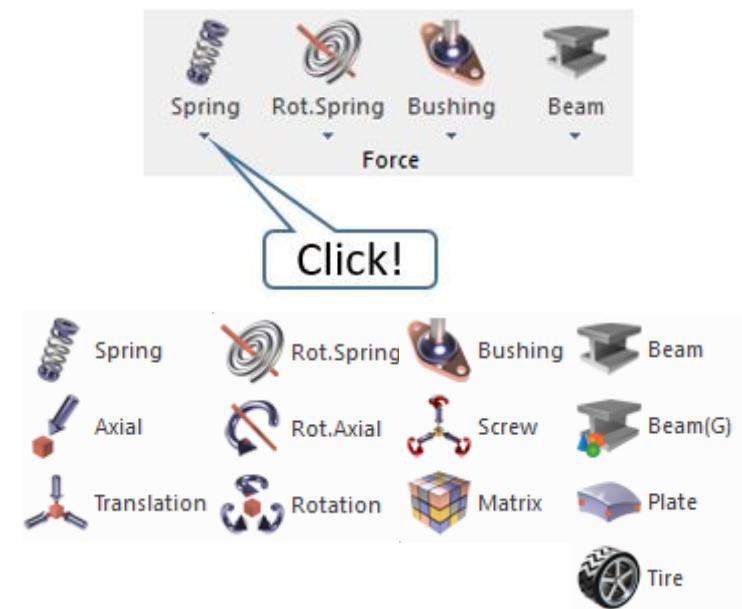


Figure 22 Force entity

4) Contact Entity

Contact은 동역학의 기본 요소 중 외력(force)을 의미하며 Body와 Body사이에 작용하는 힘을 구현하는데 사용된다. Force Entity와는 구현방법에서 차이가 있을 뿐 운동방정식에 입력되는 형태는 동일하다.

Contact은 매 순간 하중의 발생위치 및 방향이 달라지는 힘 요소로서 접촉면의 정의 방법 및 접촉 위치계산 방법에 따라 그 형태가 매우 달라진다.

자유 곡면에 대한 접촉으로서는 Solid to Solid와 Geo Surface contact이 대표적으로 사용되며, 접촉면의 형태가 Sphere나 Box 또는 Cylinder와 같이 이론적인 계산이 가능한 경우 Primitive 3D Contact을 사용할 수 있다.

Contact은 모델의 형태와 해석의 종류 및 방향에 따라 매우 달라지며 그때마다 해석에 유리한 접촉모델을 선택하는 것이 중요하다.

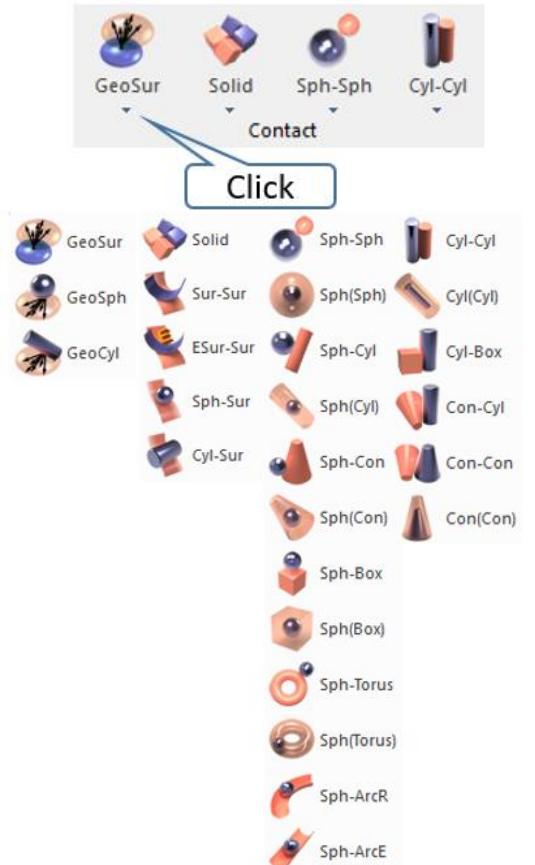
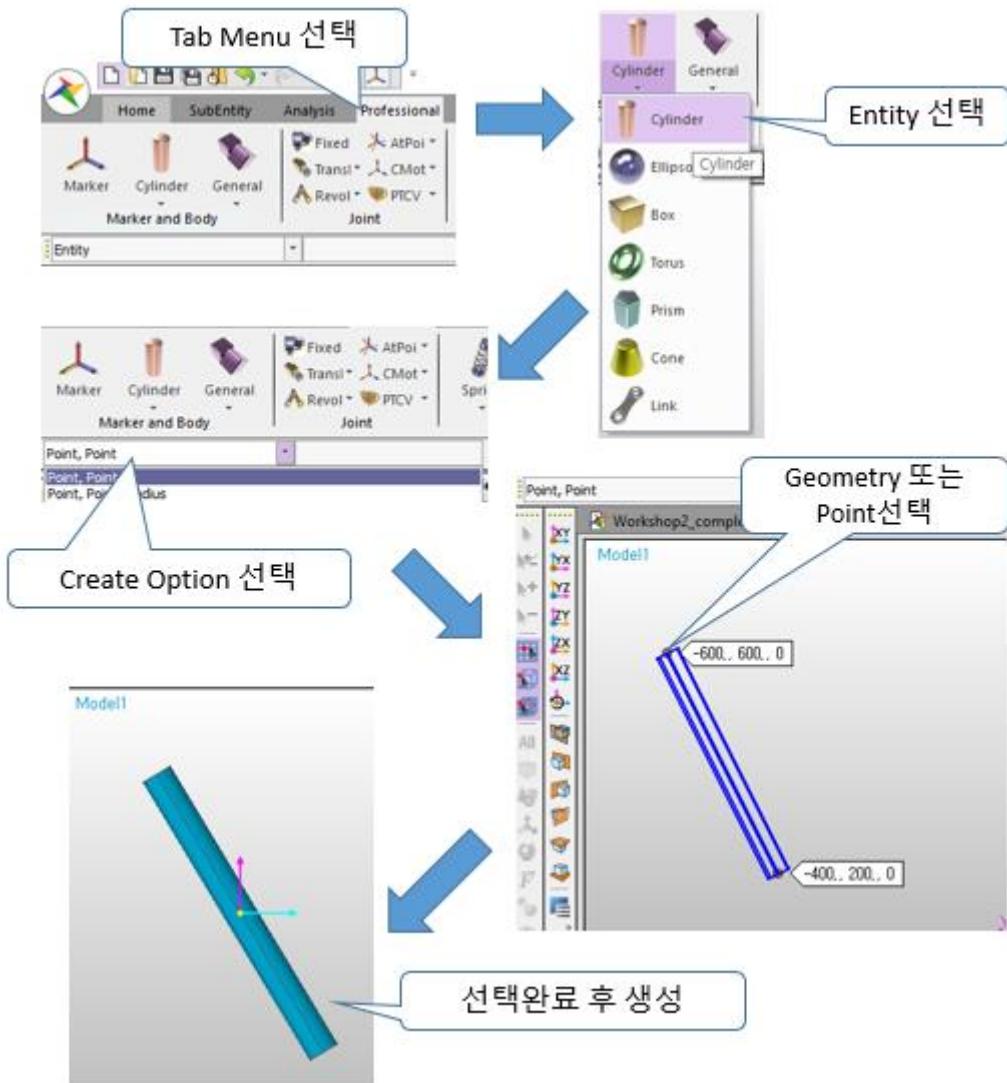


Figure 22 Contact entity

5. Ribbon Menu를 이용한 Modeling 작업 순서

Tab 메뉴를 선택 후 원하는 Entity 버튼을 누르고 Create option창의 Menu를 선택 후 Working Window에 원하는 위치 또는 Vector를 선택하면 생성하고자 하는 Entity가 만들어진다.



6. Body Edit Mode

RecurDyn의 Body는 독립적인 Database를 가지고 있다. 즉, Model Database의 내부에 각 Body별 Database를 가지고 있기 때문에 Body가 가지고 있는 Geometry를 수정하기 위해서는 Body의 Database에서 파라미터를 조정하여야 한다.

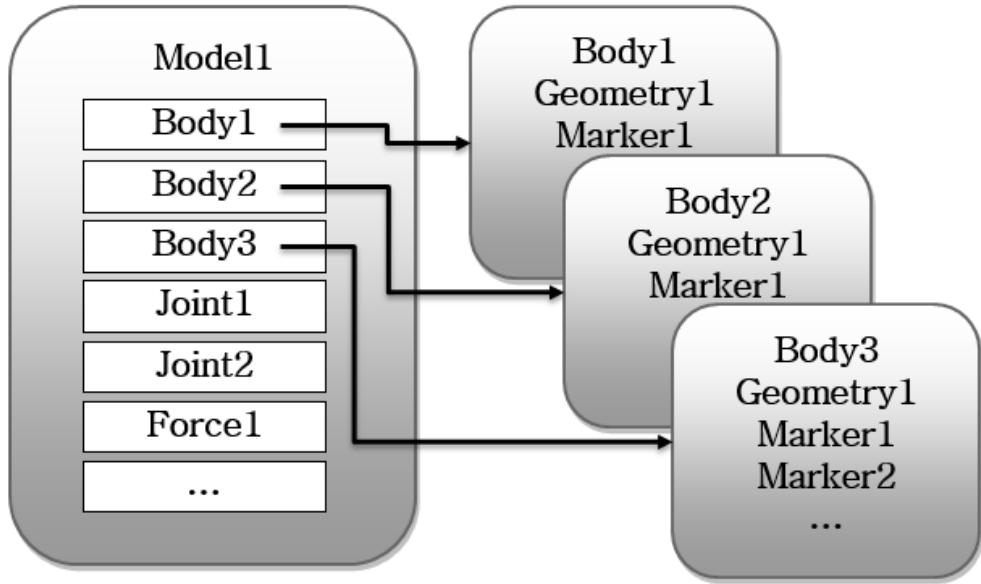


Figure 23 RecurDyn Model의 Database 구성

Body의 Database에 접근하기 위해서는 Body를 더블 클릭하거나 Database Window에서 Body를 선택 후 마우스 오른쪽 버튼을 누르고 ‘Edit’메뉴를 선택하면 된다.

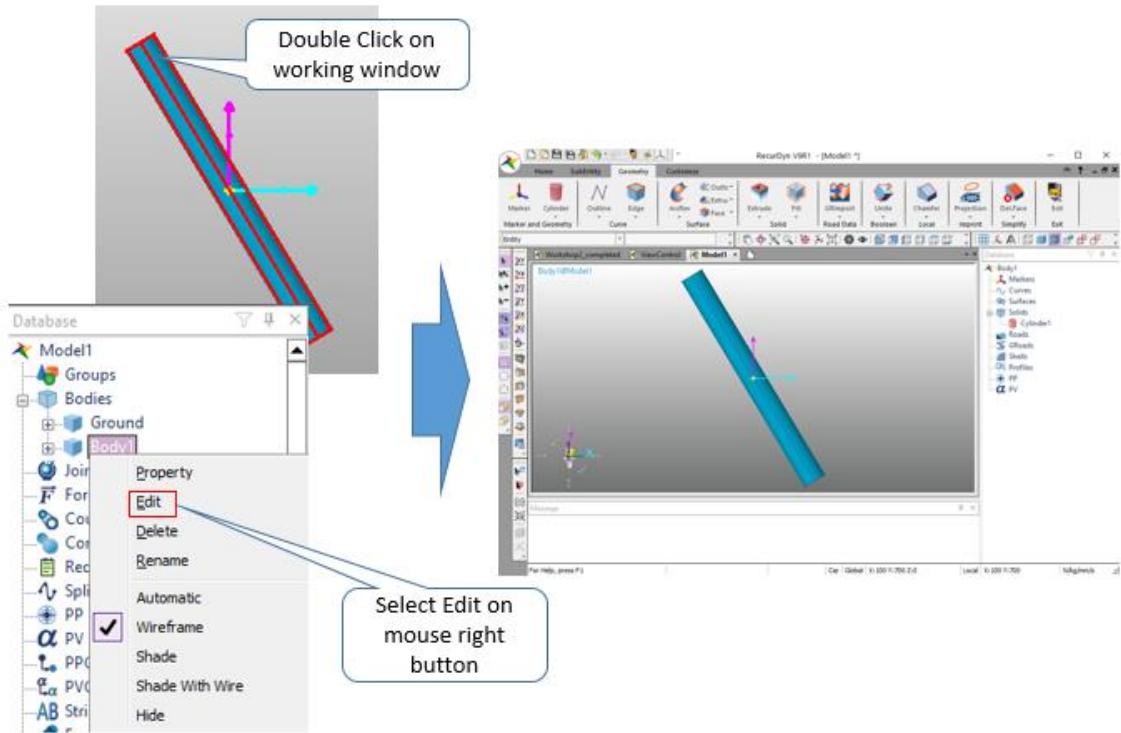


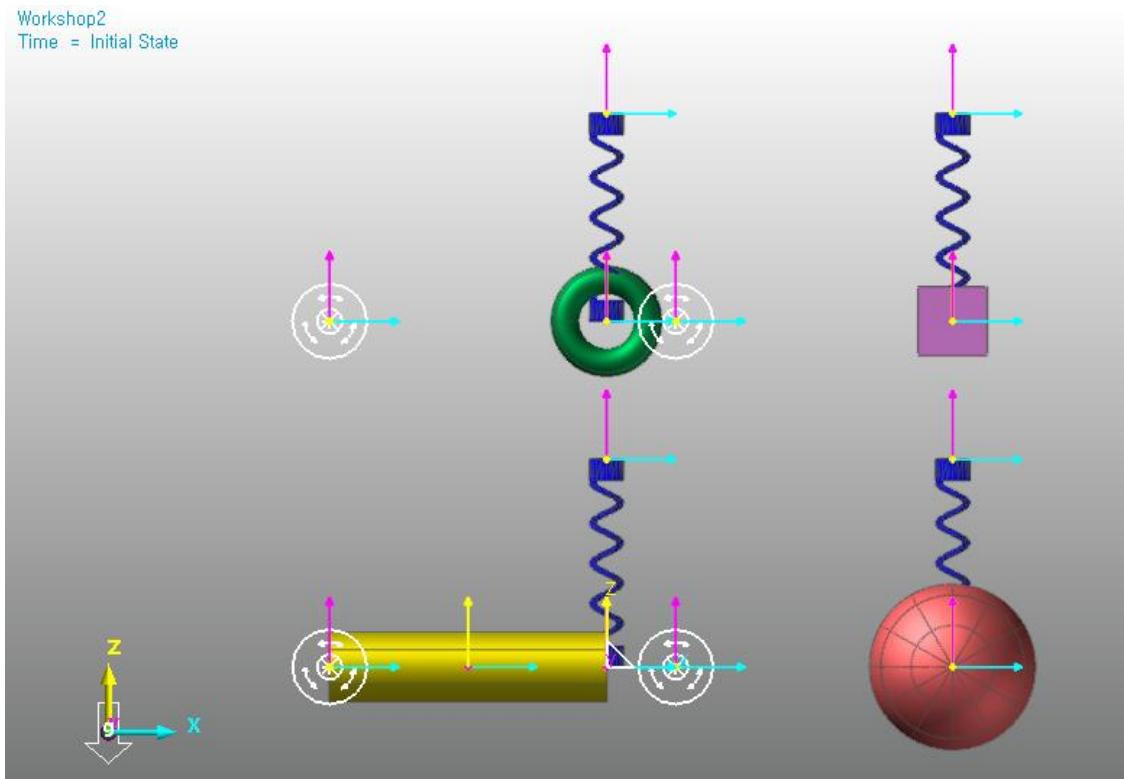
Figure 24 Body edit mode 진입 방법

Workshop 2 Simple Model

내용: 2장의 강의에서 배운 Working Window의 화면을 조정하는 방법을 익히고, 여러 가지 동역학적 요소(Body, Joint, Force)를 생성해 본 후 해석까지 수행한다.

본 워크샵을 통해 아래의 관련 기능을 익힐 수 있다

- Body 생성방법
- Joint 생성방법
- Force 생성방법
- Joint 생성방법



수행시간	40분
난이도 Level	1

Workshop 수행을 위해 필요한 사항

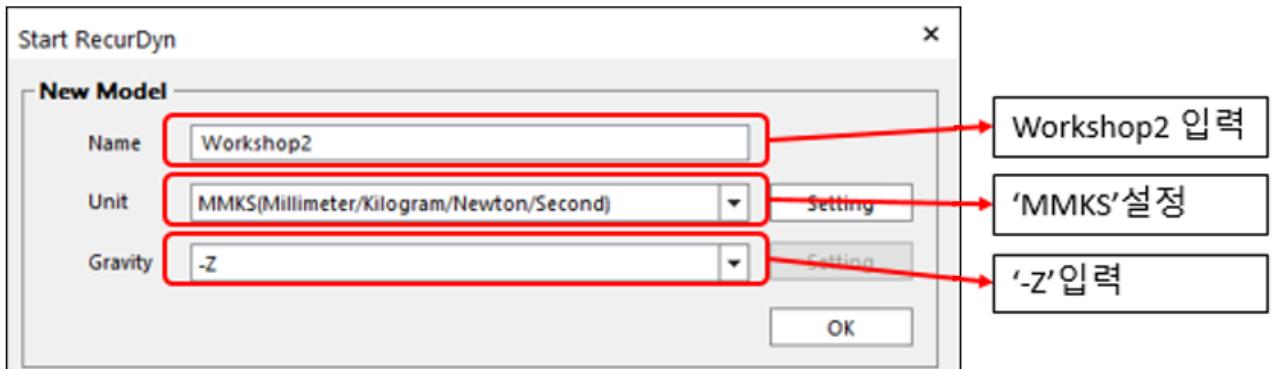
- RecurDyn V9R1 이상

STEP 1 새로운 모델 생성: 새로운 모델을 생성한다. 이 때 중력의 방향을 -z축으로 설정하며 단위는 mm, kg, s로 설정

1. RecurDyn 실행

Window의 시작메뉴에서 → 모든프로그램 → FunctionBay, Inc → RecurDyn V9R1 → RecurDyn V9R1 실행

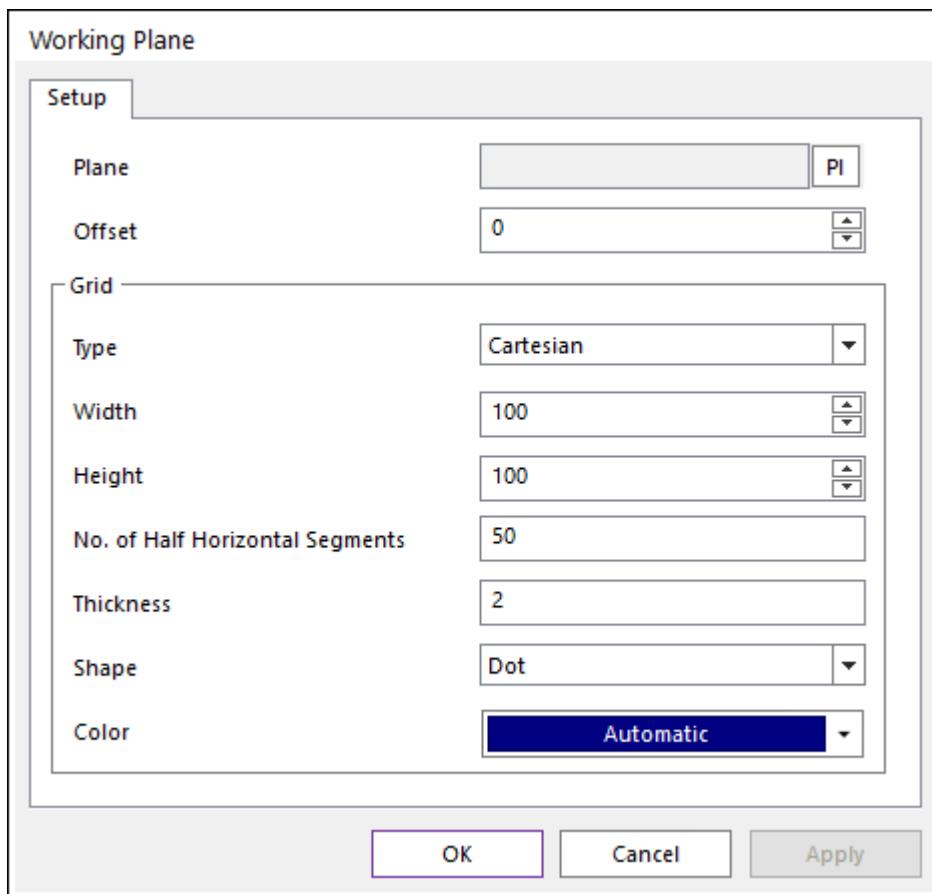
2. Name에 Workshop2 입력, Unit을 MMKS로 설정, Gravity를 -Z로 설정



3. Ok 버튼을 누른다

STEP 2 모델링을 위한 화면 설정: 중력을 -Z방향으로 설정하였으며 모델은 XZ평면상에 구현할 것이다. 따라서 모델링을 위한 GRID를 XZ평면으로 바꾸고 GRID정보를 입력

1. Grid On/Off 버튼을 눌러 화면에 Grid가 보이도록 설정
2. Snap to Grid 버튼을 눌러 Grid Point가 우선적으로 선택되도록 설정
3. Working Plane change(axis)버튼을 누르고 xz평면을 설정
4. working plane setup버튼을 누름: Working Plane설정 창이 Pop up



5. Width와 Height에 각각 50 입력, No. of Half Horizontal Segments에 100 입력

* Width와 Height는 각각 하나의 Grid 사각형의 높이와 폭을 의미하며 No. of ... 는 한쪽 방향으로 Grid 사각형의 개수를 나타낸다.

6. Ok버튼 누름

STEP 3 화면 Control test

1. Zoom in/out: 화면을 확대 및 축소함

Method A) zoom 버튼을 누르고 마우스 왼쪽 버튼을 클릭한 상태

에서 위로 움직이면 zoom out, 반대로 움직이면 zoom in



Method B) 키보드 'z' 버튼을 누르고 마우스 왼쪽 버튼을 클릭한 상태에서 위로 움직이면 zoom out, 반대로 움직이면 zoom in

Method C) 마우스 스크롤 버튼을 위로 굴리면 zoom out, 아래로 굴리면 zoom in

2. Translation: 화면을 모델의 좌우로 이동



Method A) Translate 버튼을 누르고 마우스 왼쪽 버튼을 클릭한 상태에서 상하좌우로 움직이면 이동

Method B) 키보드 'T' 버튼을 누르고 마우스 왼쪽 버튼을 클릭한 상태에서 상하좌우로 움

직이면 이동

Method C) 마우스 가운데 버튼을 누르고 상하좌우로 움직이면 이동

3. View Center: 화면의 중심을 원하는 지점으로 이동

Method A)  View Center 버튼을 누르고 화면상의 특정점을 클릭

Method B) 키보드 ‘C’ 버튼을 누르고 화면상의 특정점을 클릭

4. Rotation: 화면을 View Center 기준으로 회전

Method A)  Rotate 버튼을 누르고 마우스 왼쪽 버튼을 클릭한 상태에서 상하좌우로 움직이면 회전

Method B) 키보드 ‘T’ 버튼을 누르고 마우스 왼쪽 버튼을 클릭한 상태에서 상하좌우로 움직이면 회전

5. Fit: 모든 Entity가 화면에 나타나도록 화면 설정

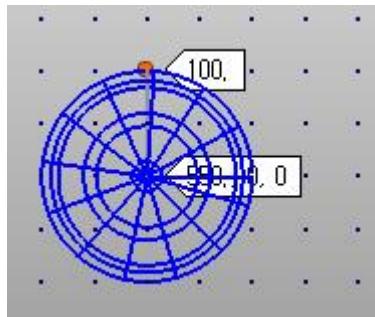
Method A)  Fit 버튼을 누름

Method B) 키보드 ‘F’ 버튼을 누름

STEP 4 Ellipsoid Body 생성

1.  Ellipsoid 버튼을 누르고 화면상의 첫 번째 Point(500, 0, 0)를 클릭

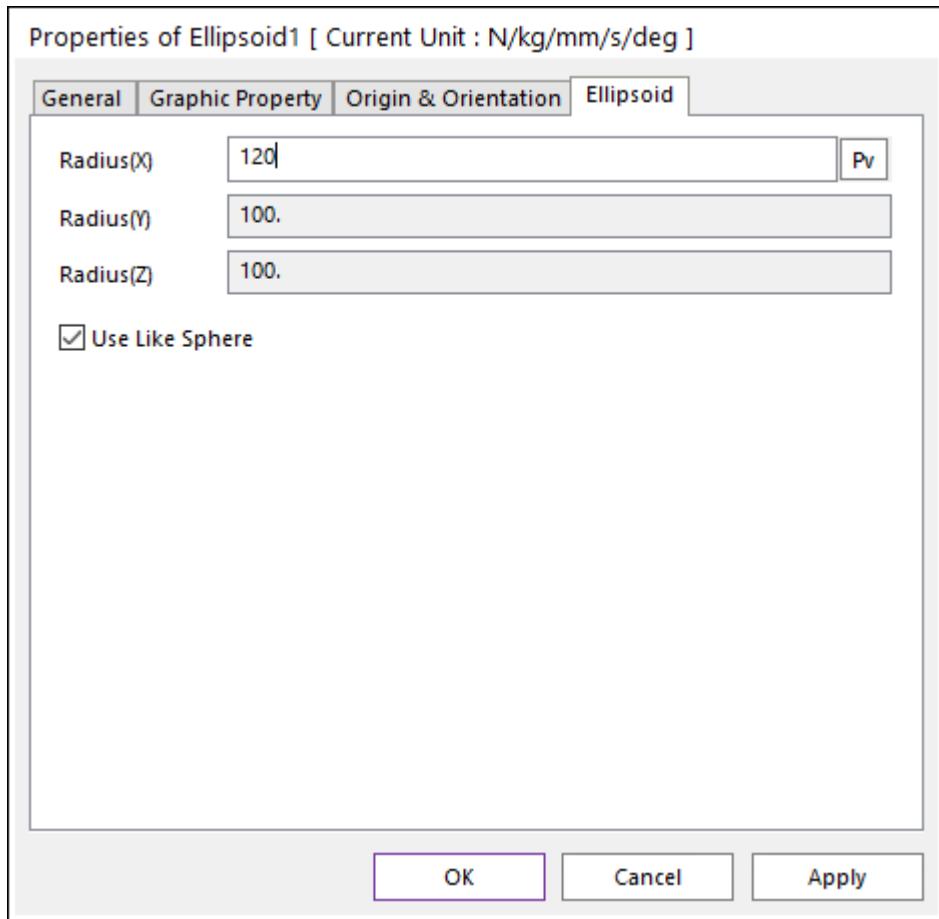
2. Ellipsoid의 반경이 100mm가 되도록 두 번째 Point를 클릭



3. 생성된 Ellipsoid를 더블클릭(Body edit mode 진입)

4. Database windows에서 Ellipsoid1을 선택 후 Mouse 오른쪽 버튼을 누르고 ‘Property’ 선택; ※Geometry를 선택후 키보드의 ‘P’버튼을 누르면 동일한 작업 수행

5. Radius를 120으로 입력



6. Ok 버튼 누름

7.  Exit 버튼을 눌러 Body edit mode를 나옴

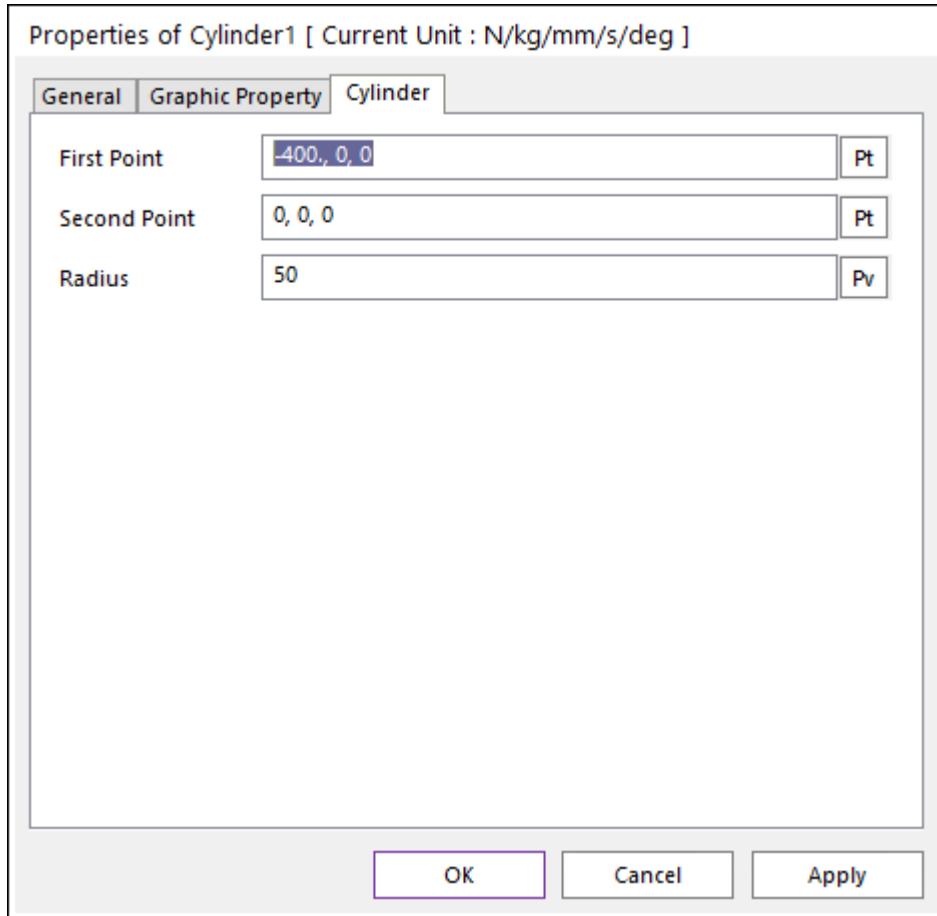
* Working Window에서 마우스 오른쪽 버튼을 누르면 메뉴에 ‘Exit’가 있으며 동일한 기능임

8. Database window에서 Body1의 이름을 Body_Ellipsoid로 변경

STEP 5 Cylinder Body 생성

1.  Cylinder버튼을 누르고 화면상의 첫 번째 Point (-500, 0, 0)를 클릭
2. 두 번째 Point로 화면상의 0, 0, 0 위치를 클릭
3. 생성된 Cylinder를 더블클릭(Body edit mode진입)
4. Database windows에서 Cylinder1을 선택 후 마우스 오른쪽 버튼을 누르고 Property 메뉴를 선택;
※Geometry를 선택 후 키보드의 ‘P’ 버튼을 누르면 동일한 작업 수행 Radius를 50으로 입

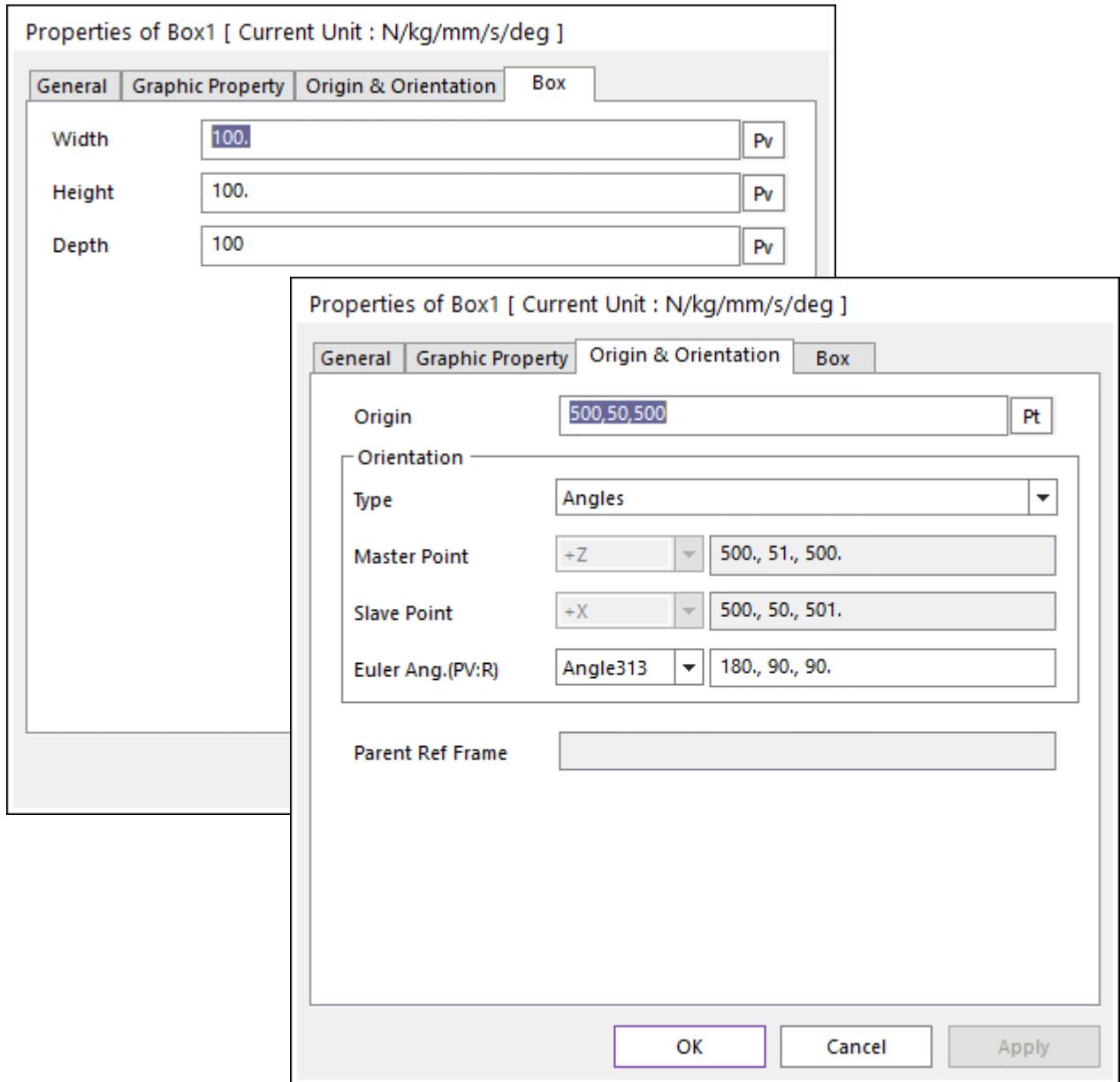
력 후 OK버튼을 누름



5. Exit 버튼을 눌러 Body edit mode를 나옴

STEP 6 Box Body생성

1.  Box 버튼을 누르고 화면상의 첫 번째 Point (450, 0, 550)를 클릭
2. 두 번째 Point로 화면상의 550, 0, 450 위치를 클릭
3. 생성된 Box를 더블클릭(Body edit mode진입)
4. Database windows에서 Box1을 선택 후 Mouse 오른쪽 버튼을 누르고 'Property' 선택
※ Geometry를 선택 후 키보드의 'P'버튼을 누르면 동일한 작업 수행되며, Depth의 값을 100입력 후 Origin & Orientation Tab에서 Origin의 값을 500, 50, 500으로 입력



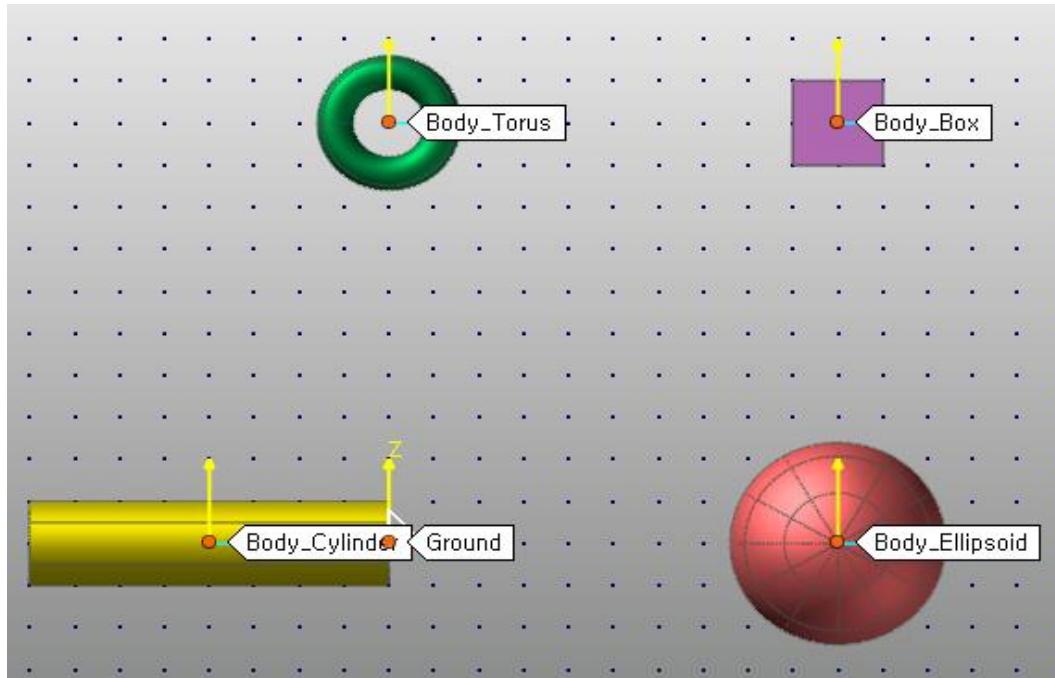
5. Ok버튼을 누르고 Exit 버튼을 눌러 Body Edit Mode를 나옴

STEP 7 Torus Body 생성

1.  Torus버튼을 누르고 화면상의 첫 번째 Point (0,0,500)를 클릭
2. 두 번째 Point로 Torus의 반경이 500이 되도록 화면상의 0,0,450 위치를 클릭
3. 생성된 Torus를 더블클릭(Body edit mode진입)
4. Database windows에서 Torus1을 선택 후 Mouse 오른쪽 버튼을 누르고 ‘Property선택;’
※Geometry를 선택후 키보드의 ‘P’버튼을 누르면 동일한 작업 수행
5. Major Radius를 60으로 입력, Minor Radius를 20으로 입력 후 OK버튼

6. Exit 버튼을 눌러 Body Edit Mode를 나옴

7. STEP4~ STEP7까지 생성한 Body형태가 그림과 같이 나타남



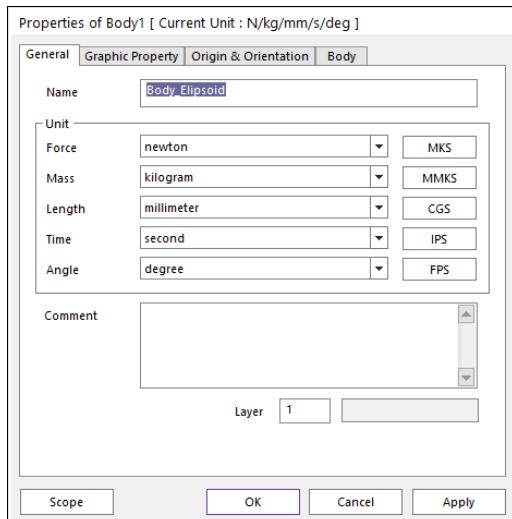
STEP 8 Body Name 변경: 생성된 Body는 Body라는 철자에 Integer값을 붙여서 Body1, Body2...와 같이 명명된다. Body는 차후 사용자의 요구에 따라 새롭게 이름을 부여해야 한다. 이는 모델링의 편의성을 위해서 반드시 필요한 과정임

1. Working Window상의 한 Body1을 선택

2. 마우스 오른쪽 버튼의 메뉴에서 ‘Property’ 선택

* 단축버튼 ‘P’ 또는 Database window

3. General Tab에서 Name을 Body_Ellipsoid로 변경



4. Ok버튼을 누름
5. Database Window에서 Body2 선택 및 마우스 오른쪽 버튼 메뉴에 ‘rename’선택
6. Highlight된 이름 입력란에 ‘Body_Cylinder’입력 후 Enter
7. Database Window에서 Body3 선택 후 rename 메뉴를 통해 ‘Body_Box’로 바꾸어줌
8. Database Window에서 Body4 선택 후 rename 메뉴를 통해 ‘Body_Torus’로 바꾸어줌

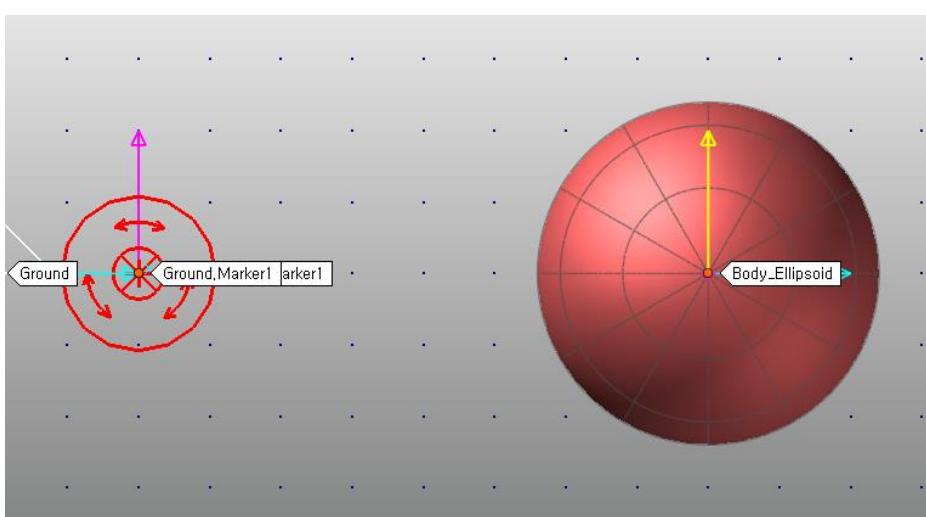
※ Body의 이름을 바꾸는 작업은 Property 창에서 수행할 수 있으며, Database Window에서 직접 수행할 수도 있다. 사용자가 편리한 방법을 사용하여 각 Body마다 고유의 이름을 부여하여 각 Body가 혼동되는 일이 없도록 해야 한다. 이러한 명명방법은 Joint와 Force 모두 동일하며 이름을 부여할 때는 ‘_’나 대문자 또는 숫자를 이용한 연속된 단어이어야 하며 가급적 사용자가 구분하기 쉽게 입력하여야 한다.

Example: Lower_control_arm, Sliding_arm_upper…, Link_body1
LowerControlArm, SlidingArmUpper, LinkBody1 …

STEP 9 Joint 생성: 각 Body에 Pendulum 형태로 Revolute Joint를 생성



1. Revolute Joint 버튼을 누르고 첫번째 Body로 Ground를 선택
2. 두 번째 Body로 Body_Ellipsoid를 선택
3. 세 번째 위치로 (100,0,0) 선택 (화면을 zoom in 하여 선택하면 쉬움)



4. Auto Operation버튼을 눌러 반복생성 기능을 On한다



5. Revolute Joint 버튼을 누르고 첫번째 Body로 Ground를 선택

6. 두 번째 Body로 Body_Cylinder를 선택

7. 세 번째 위치로 (-400,0,0)선택

* 반복작업 기능을 선택하였을 경우 해당 Entity의 생성을 반복하여 수행 한다. 즉, Revolute Joint의 버튼을 다시 누르지 않고서 생성과정을 반복하는 것이다. 이 기능은 Auto operation 버튼을 끌 때까지 지속적으로 반복되며 다른 버튼의 기능이 작동하지 않으므로 작업이 끝난 후 반드시 Auto Operation 버튼은 꺼주어야 한다

8. 첫번째 Body로 Ground를 선택

9. 두 번째 Body로 Body_Box를 선택

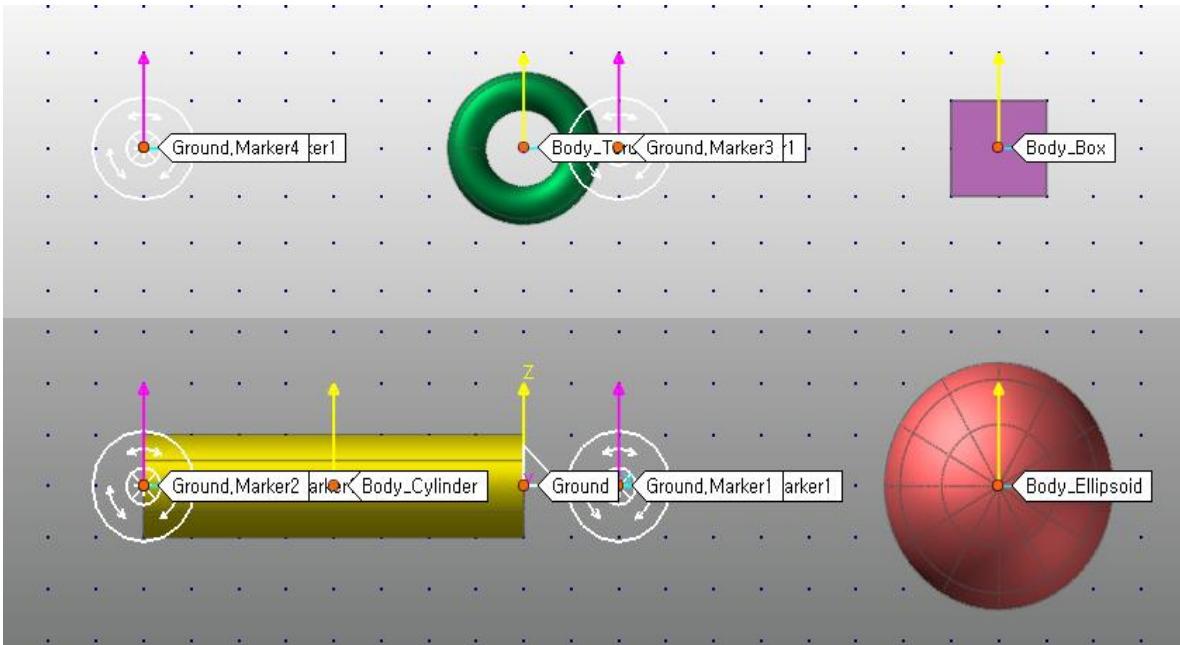
10. 세 번째 위치로 (100,0,500) 선택

11. 첫번째 Body로 Ground를 선택

12. 두 번째 Body로 Body_Torus를 선택

13. 세 번째 위치로 (-400,0,500) 선택

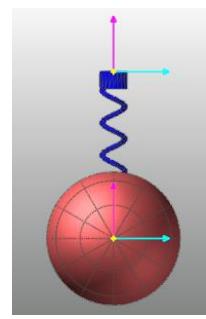
14. Auto Operation 버튼을 눌러 꺼준다



STEP 10 Force 생성: 각 Body에 Spring 요소를 연결하여 동역학 모델을 완성



1. 스프링을 클릭하고 첫번째 Body로 Ground를 선택



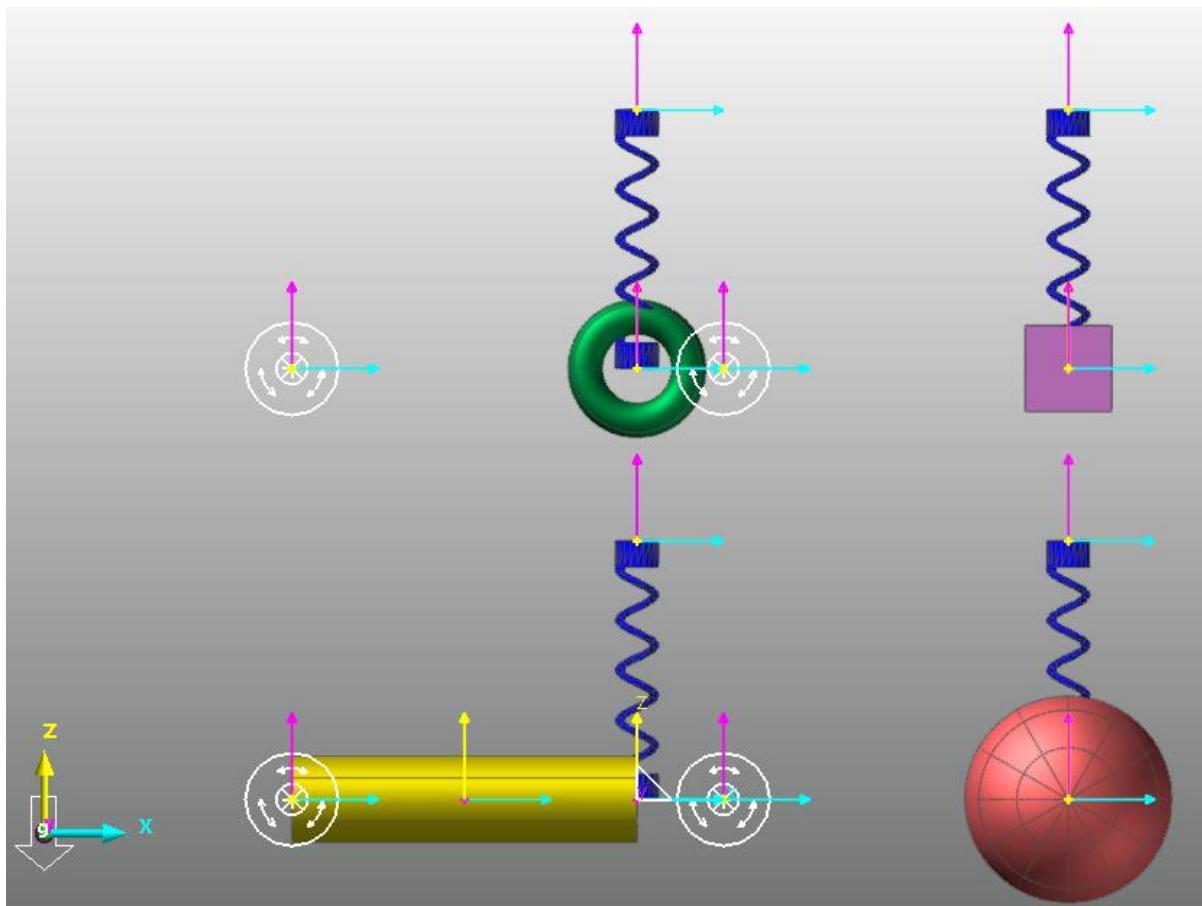
2. 두 번째 Body로 Body_Ellipsoid를 선택

3. 세 번째 위치로 (500,0,300)선택

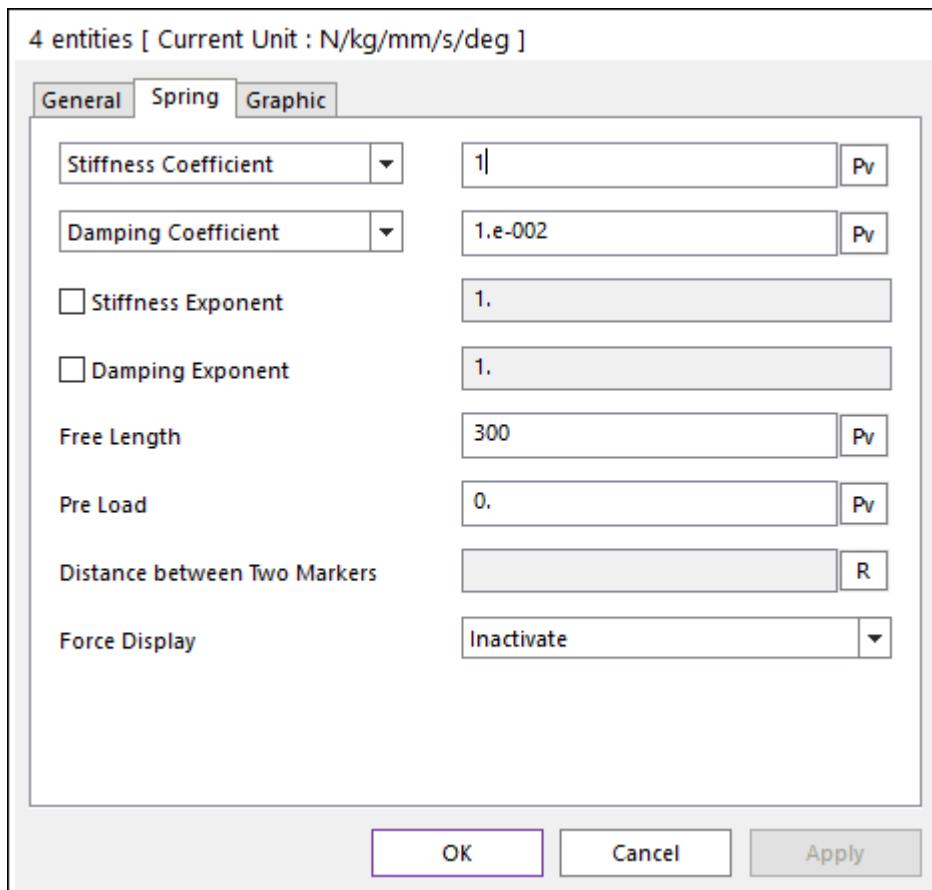
4. 네 번째 위치로 (500,0,0)선택

5. 동일한 방법을 이용하여 아래의 표와 같이 Spring 요소를 생성한다

Spring Name	첫 번째 Body	두 번째 Body	첫 번째 위치	두 번째 위치
Spring2	Ground	Body_Cylinder	0,0,300	0,0,0
Spring3	Ground	Body_Box	500,0,800	500,0,500
Spring4	Ground	Body_Torus	0,0,800	0,0,500



6. 생성한 4개의 스프링의 강성과 감쇠특성 값을 수정하기 위해 Working Window에서 Ctrl버튼을 누른 채로 4개의 스프링을 Click하여 복수의 스프링 Entity를 선택하고 ‘P’버튼을 누른다.

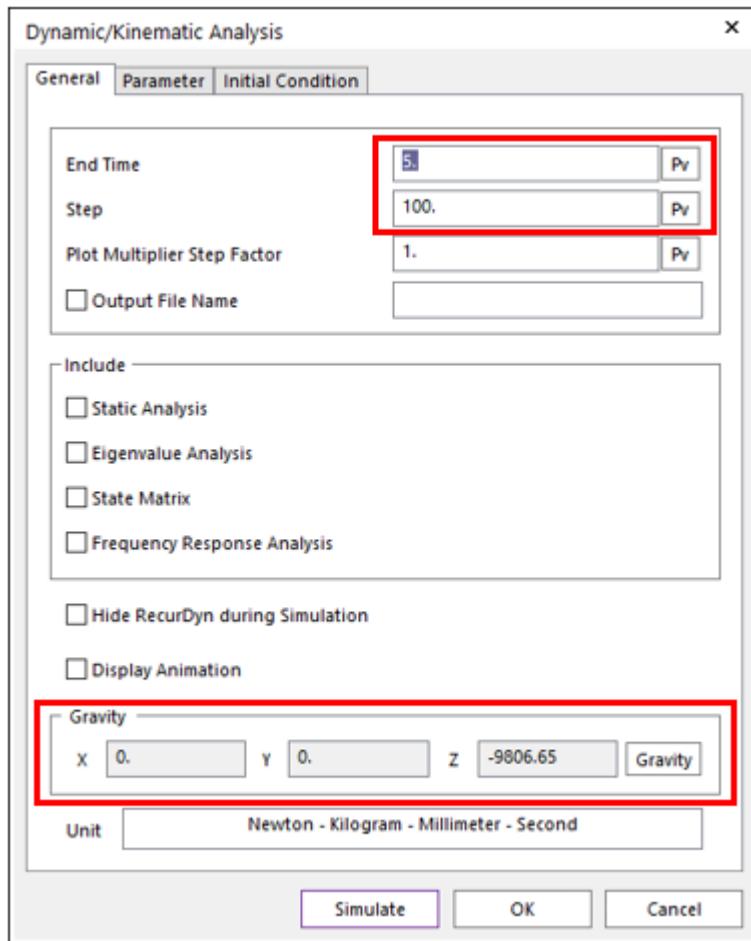


7. 스프링 Property창이 나타나면 Spring Coefficient는 1.0의 값을, Damping Coefficient에는 0.01의 값을 입력하고 Ok버튼을 누른다.

※ RecurDyn은 복수의 Entity를 선택하여 한번에 Property를 수정할 수 있으며, 이 때 Property창에는 선택된 Entity의 개수가 나타난다. 단, 복수의 Entity의 종류는 한가지여야 한다. 복수의 Entity를 선택하기 위해 반드시 Working Window를 이용할 필요는 없다. Database Window에서 Ctrl버튼이나 Shift버튼을 누른 채로 선택하면 동일한 작업이 가능하다.

STEP 11 Simulation 수행

1. Analysis Professional Analysis Tab으로 이동
2. Dyn/Kin 버튼을 누른다. Dynamic/Kinematic Analysis 창이 열림
3. Gravity창에 X와 Y값에 0.0을 입력하고 Z값에는 -9806.65 입력
4. End Time 5, Step 500 입력 후 Simulation버튼을 누름

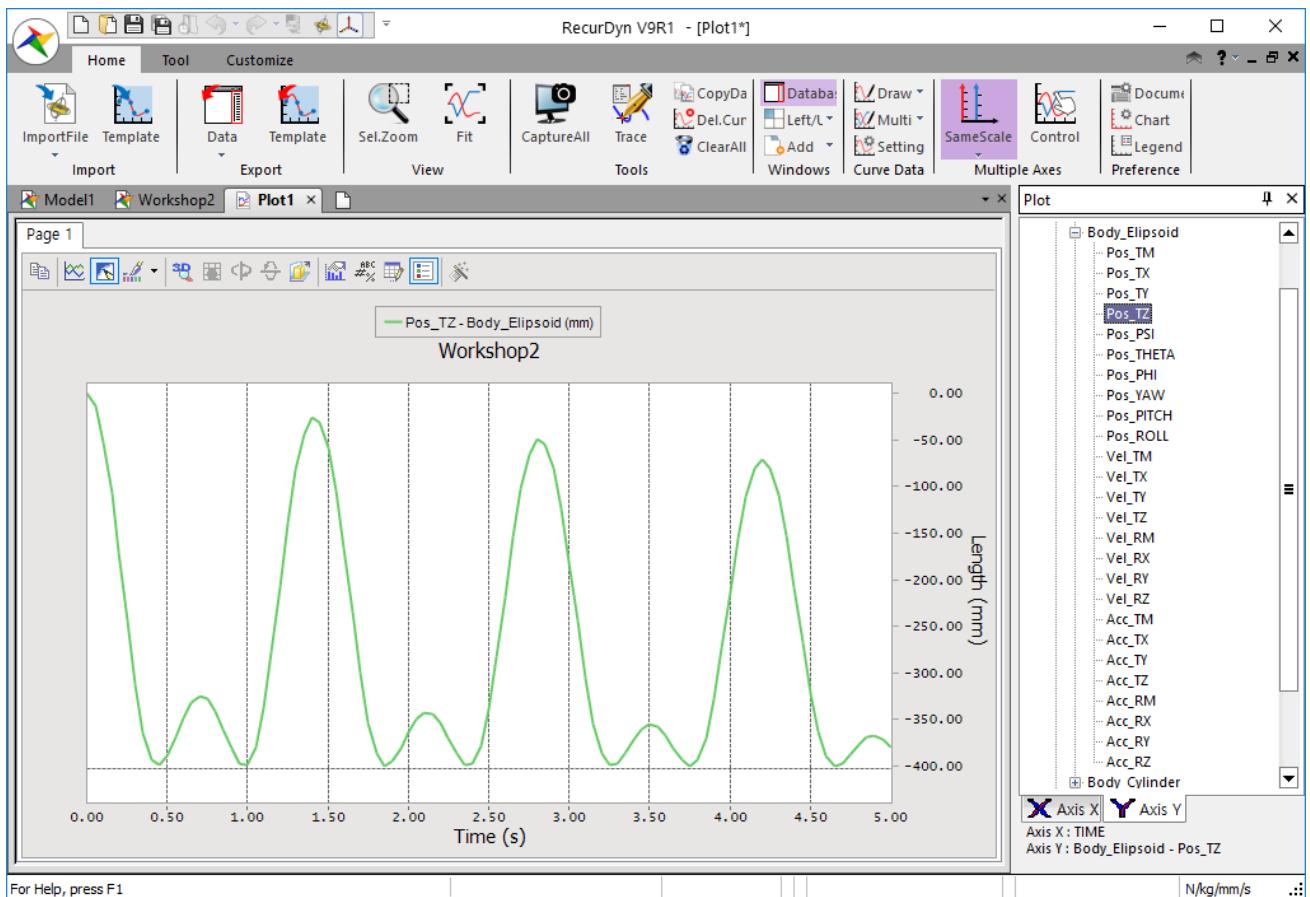
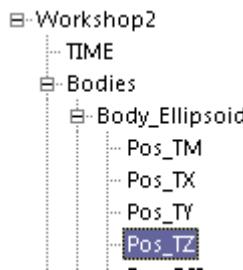


STEP 12 해석 결과 확인

1. Animation Control 메뉴의 Play버튼을 눌러 동영상을 확인
2. Plot_Result버튼을 눌러 Postprocessor로 이동

3. Plot database window에서 Workshop2.Bodies.Body_Ellipsoid.Pos_TZ를 더블클릭하여 그

래프를 그려본다



Chapter 3. Post-processor Interface

Lecture:

RecurDyn Post-processor를 이용하여 해석결과를 확인하는 과정을 익힌다

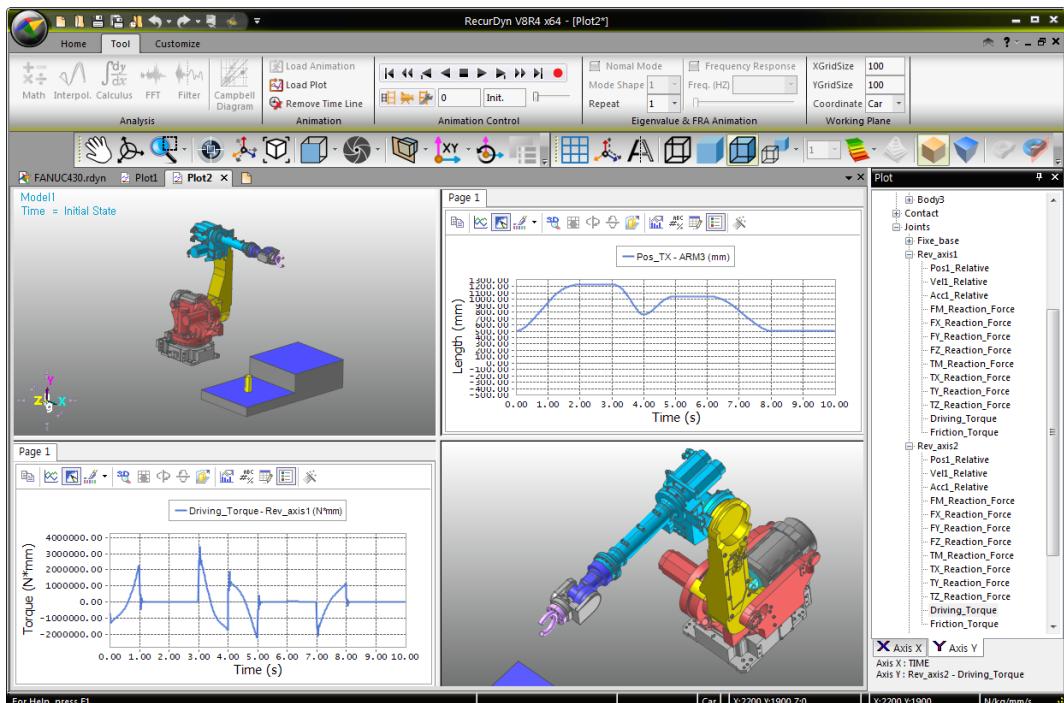
Workshop:

Chapter2에서 수행한 모델을 이용하여 해석을 수행하고 그 내용을 바탕으로 Plot, Multi-plot, Animation까지 전반적인 프로세스 과정



소요 시간

강의명	시간(분)
RecurDyn Overview2	30 분
Workshop	30 분
총합	60 분



1. RecurDyn Post processor

RecurDyn에 내장되어 있는 Postprocessor는 동역학 해석 결과를 그래프로 확인하거나 동영상 데이터로 출력하는 기능을 제공하며, 추가적으로 데이터 변환 및 분석을 위한 Analysis Tool과 데이터를 외부로 출력하기 위한 Export 기능을 제공한다. 이러한 여려 가지 후처리 기능은 해석결과를 다양한 방법을 통해 정리 및 추출할 수 있도록 도와준다.

1) Interface

RecurDyn의 Postprocessor는 Main toolbar, Plot window 그리고 Database window로 구성되어 있으며 데이터 처리를 위한 Tool tab에는 사칙연산 외에 필터와 FFT기능 등을 가지고 있다

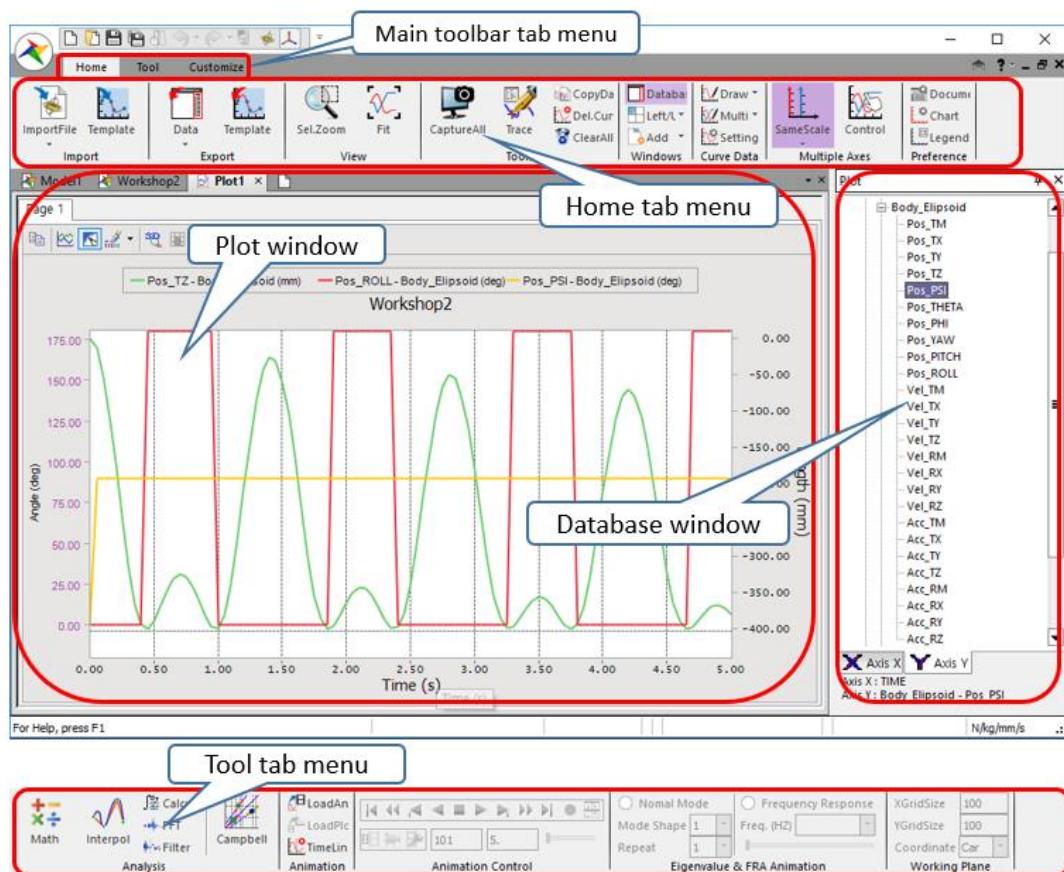


Figure 25 RecurDyn Post-processor interface

2) RecurDyn simulation result file handling

RecurDyn에서 해석을 시작하면 모델이 저장되어 있는 폴더에 새로운 폴더를 생성하면서 해석모델 및 결과 데이터를 아래의 확장자를 가진 파일로 저장한다. 각 확장자의 파일이 가지는 데이터 정보는 아래의 표와 같으며, 이 중 해석 결과를 저장하는 파일은 rplt와 rad 파일이다. 따라서 후처리(post process) 작업을 수행할 때 이 두 가지 파일은 반

드시 필요하다. 그 외의 파일들은 특정한 해석을 수행할 때 필요한 파일들이므로 기본적인 해석 및 후처리 과정에서는 불필요하다.

Extension	Contents	Format
.log	Solver 정보 출력(Old type)	Text
.msg	Solver 정보 출력(Current type)	Text
.out	Body initial condition 및 Eigen solution 결과 출력	Text
.rad	Animation data	Binary
.rdp	Design Parameter 값 출력 (Autodesign 사용시)	Text
.req	Request data 출력(Old type)	Text
.rmd	Solver input data	Text
.rpi	Performance index 값 출력 (Autodesign 사용시)	Text
.rplt	모든 해석 Data 저장	Binary
.rpv	Parametric value 값 출력	Text

후처리 작업에서 rplt 파일을 이용하여 그래프를 그리거나 rad 파일을 이용하여 동영상 을 저장하고자 할 때 데이터를 읽어 들이는 방법은 파일을 Import하거나 Drag & Drop방법을 통해 수행할 수 있다.

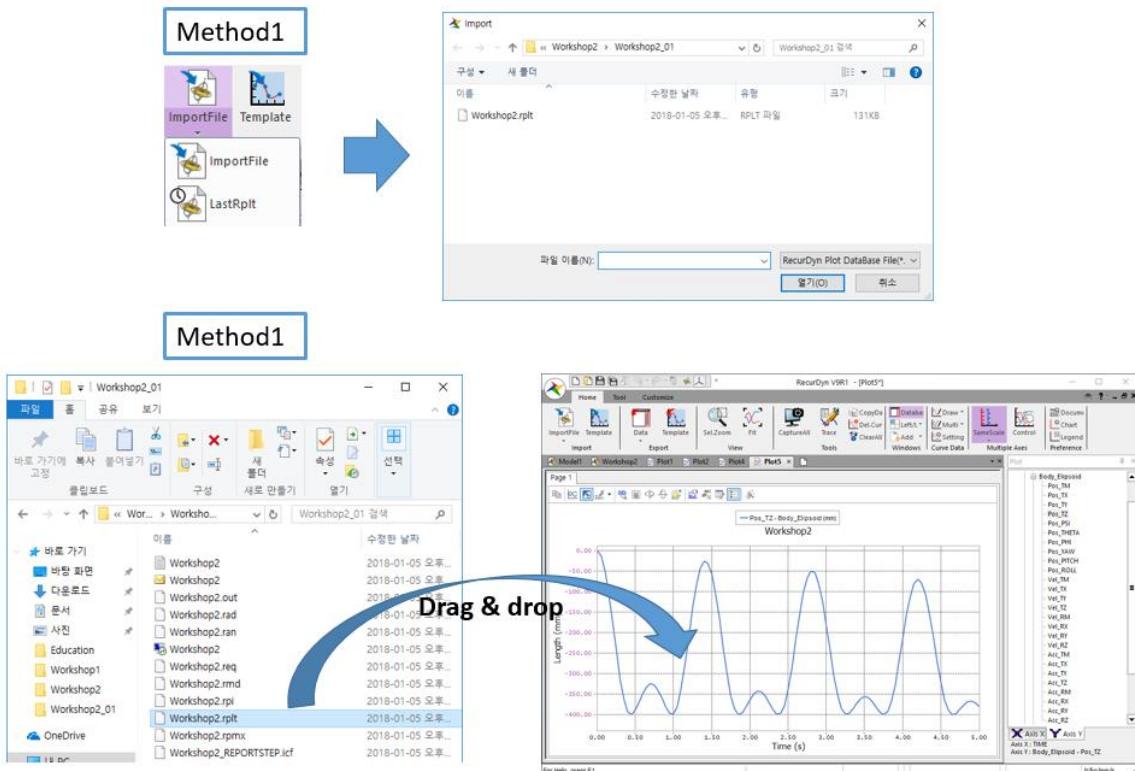


Figure 26 Rplt data file 불러들이는 방법

또한 해석 수행 직후 Main Tool Bar에서 Plot_Result 버튼을 누르면 수행한 해석 결과를 바로 그래프로 그려 볼 수 있도록 자동으로 rplt 파일을 Import하여 준다.

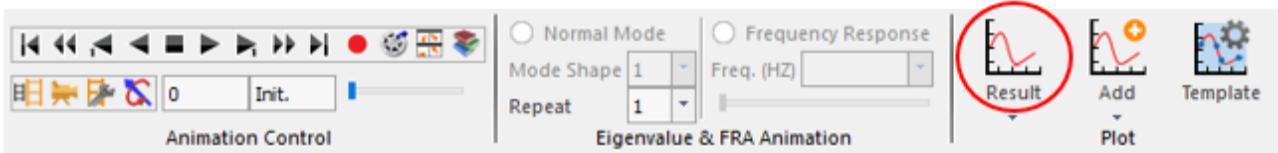
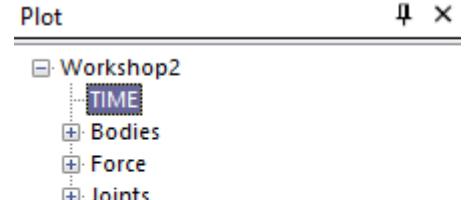


Figure 27 해석후 plot을 위해 post-processor로 전환하는 방법

3) Simulation data

시뮬레이션 해석 결과는 그림과 같은 category로 구성된 Tree구조로 되어 있으며 각 category의 의미는 다음과 같다.

- Time: 시간데이터로서 시뮬레이션의 물리적 시간
- Bodies: Global 좌표계에서 본 각 Body의 위치 속도 및 가속도
- Force: Global 좌표계에서 본 각 힘 요소의 힘과 토크
- Joints: joint에서 발생하는 반력에 대한 계산 값으로서 Global 좌표계에서 본 힘과 토크
- Couplers: Coupler joint의 반력
- Contact: Contact 요소에서 발생하는 힘을 각 Body의 CM에 대해 나타낸 값으로서 Global 좌표계에서 대한 힘과 토크
- Request: Request로 설정한 출력
- Tire: Tire 요소에서 계산된 힘과 변위에 대한 결과
- VariableEq: VE로 정의된 요소가 가지는 값에 대한



4) Plot draw process

시뮬레이션 데이터를 입력한 상태에서 각 데이터를 그래프로 나타내는 방법은 매우 간단하다. Database window에서 입력된 데이터의 Tree구조 최 하단의 값을 더블 클릭하면 간단히 그래프를 그릴 수 있다.

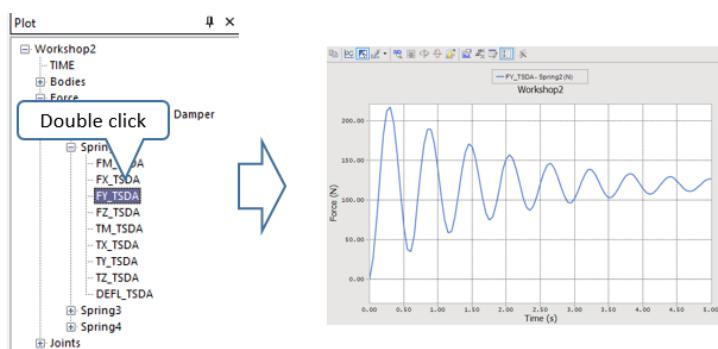


Figure 28 Post-processor에서 데이터를 그래프로 그리는 방법

5) Animation play and record process

시뮬레이션 데이터를 이용하여 Post process에서 결과를 동영상으로 확인하고 avi파일로 저장하여 향후 PPT와 같은 자료에 활용할 수 있다. 동영상을 사용하기 위해서는 Tool menu에서 작업을 수행해야 한다. Tool menu의 load animation 버튼을 누르면 해당 모델의 Animation이 Plot창에 나타난다

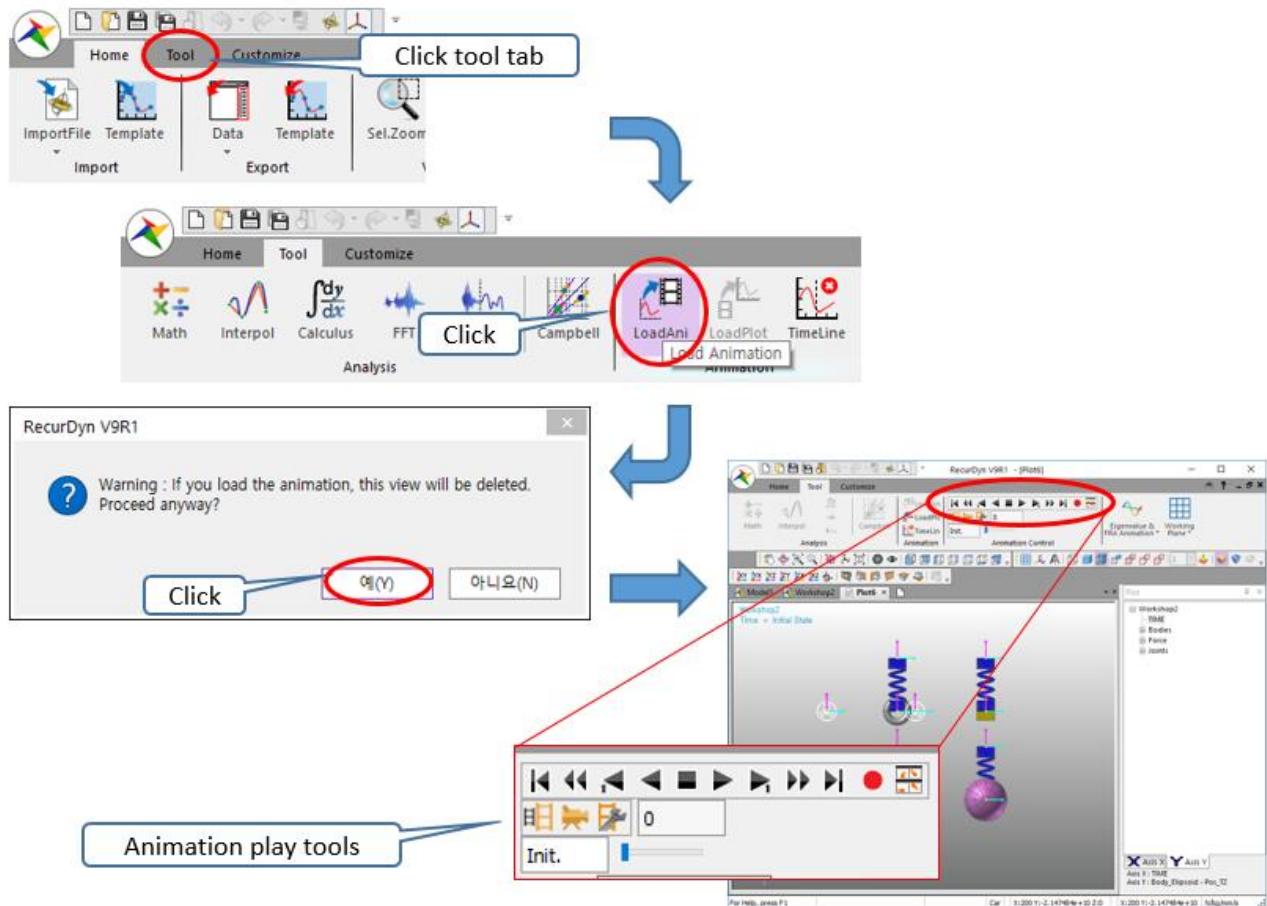


Figure 29 Post-processor에서 동영상을 재생하는 방법

6) Data file extract

해석 결과를 다른 프로그램에서 활용하기 위해 외부로 출력해야 할 경우가 있다. 이때 주로 ASCII 데이터 형태의 파일로 출력하게 되며 이를 위해 Export 기능을 제공한다

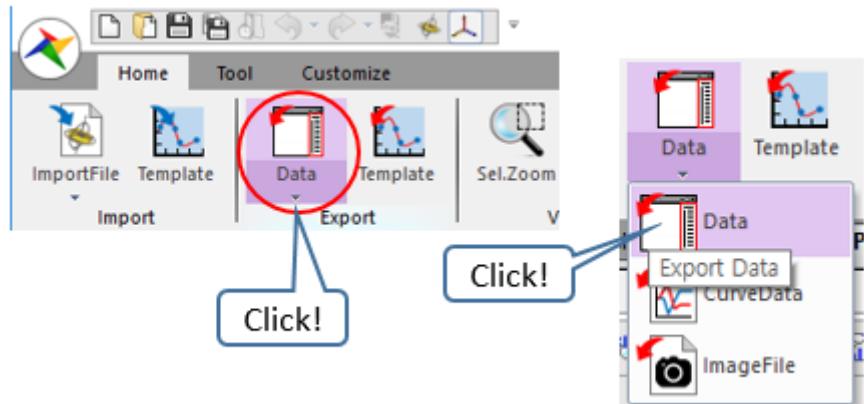


Figure 30 해석 Data를 ASCII 데이터 파일로 출력하는 방법

RecurDyn Postprocessor가 가진 주요 Export 기능은 다음과 같다

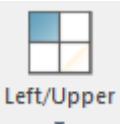
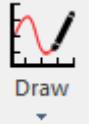
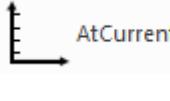
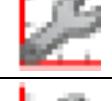
- Export Data: Database Window에 존재하는 해석결과를 직접 ASCII 파일로 출력
- Export Curve Data: Plot Window에 그려진 그래프 데이터를 ASCII 파일로 출력
- Export Image File: Plot Window에 그려진 그래프를 이미지파일로 출력
- Export Plot Template: Plot의 설정데이터인 Plot template를 파일로 출력

2. Home Tab menu



Home Tab 메뉴는 그래프를 그리고 지우는 작업을 수행하는 가장 기본적인 기능이 배치되어 있으며 그 내용은 아래의 표와 같다

아이콘	Name	설명
ImportFile Template Import	Import	외부의 시뮬레이션 결과 파일(rplt) 또는 ASCII 데이터 형태의 Array data를 Database에 입력
Data Template Export	Export	시뮬레이션 데이터 또는 Plot 데이터를 Text file 또는 Image파일로 출력
Del.Curve	Delete Curve	그래프상에 그려진 특정 Curve를 삭제 (단축키 : Delete)
ClearAll	Clear All	그래프상에 그려진 모든 Curve를 삭제 (단축키 : C)
CaptureAll	Capture All	X축, Y축의 좌표 평면을 포함한 현재 그래프를 캡쳐하여 클립보드에 저장
CopyData	Copy Data	엑셀이나 메모장에 복사할 수 있게 선택한 Plot 데이터를 클립보드에 저장.
Database	Database	Postprocess에서 Database 창을 on/off 할 수 있는 기능
Sel.Zoom	Zoom	Plot에서 선택한 영역을 Zoom in (단축키 : Z)
Fit	Fit	그려진 plot curve 전체를 볼 수 있게 x, y 좌표축의 max값을 자동으로 설정하는 기능 (단축키 : F)

	Trace Data	Curve Data를 따라가면서 원하는 지점의 x, y 값이나 기울기 등의 수치정보를 표시하는 기능
	Window	Plot window 창을 분할하여 볼 수 있게 하는 기능.
	Add Page	Plot을 그릴 새 page를 추가하는 기능.
	Delete Page	현재 선택된 page를 삭제하는 기능.
	Rename Page	현재 선택된 page의 이름을 바꾸는 기능.
	Draw	Database 창에서 선택한 data를 그리는 기능. 더블클릭하는 것과 같은 기능
	Multi Draw	여러 개의 시뮬레이션 데이터를 Database에 불러 들였을 때, 동일한 항목의 결과를 동시에 그리는 기능
	At Current Axis	현재의 좌표축 위에 그래프를 그리는 옵션, 이 옵션이 꺼져 있으면 y 축이 추가됨
	With New Pane	새로운 좌표축을 추가하여 그래프를 그림
	With Same Scale	같은 좌표 평면에 축 정보를 추가하여 그래프를 그림
	Control	Curve에 대한 x y축의 정보 또는 영역을 변경하는 기능
	Default	현재 Plot에 대한 설정을 기본 설정으로 저장, 새로운 plot에 대해서 동일 설정이 적용 됨.
	Current	여러가지 plot에 대한 기본 요소들을 설정할 수 있는 버튼, 현재 plot에 적용 됨.
	Legend Title	Plot에 그려진 data의 Legend를 바꾸는 기능

3. Tool Tab menu

아이콘	Name	설명
	Math	그려진 plot data를 이용하여 사칙연산을 수행
	Interpol	그려진 plot data에 대해 보간하여 plot
	Calculus	그려진 plot data에 대해 미분 혹은 적분을 수행하여 plot
	FFT	FFT변환을 통해 시간영역의 data를 주파수 영역의 data로 변환하여 plot
	Filter	그려진 plot data를 주파수 필터를 이용하여 데이터를 재생성 한 후 plot
	Campbell Diagram	Transient Campbell diagram을 그리는 기능
	Load Animation	선택된 plot window에서 animation을 불러오는 기능
	Load Plot	Animation이 불려진 상태에서 다시 plot 상태로 되돌아 가는 기능
	Remove Time Line	Animation 재생 시 plot window에 표시되는 time line을 제거하고 animation이 play되도록 설정하는 기능
	First frame	가장 첫 번째 프레임을 보여주는 버튼
	Fast inverse play/pause	빠르게 역으로 재생하는 버튼
	Decrease one frame	한 프레임 씩 역으로 재생하는 버튼
	Inverse play/pause	역으로 재생하는 버튼
	Stop	정지 버튼
	play/pause	순방향으로 재생하는 버튼
	Increase one frame	한 프레임 씩 재생하는 버튼
	Fast play/pause	빠르게 재생하는 버튼

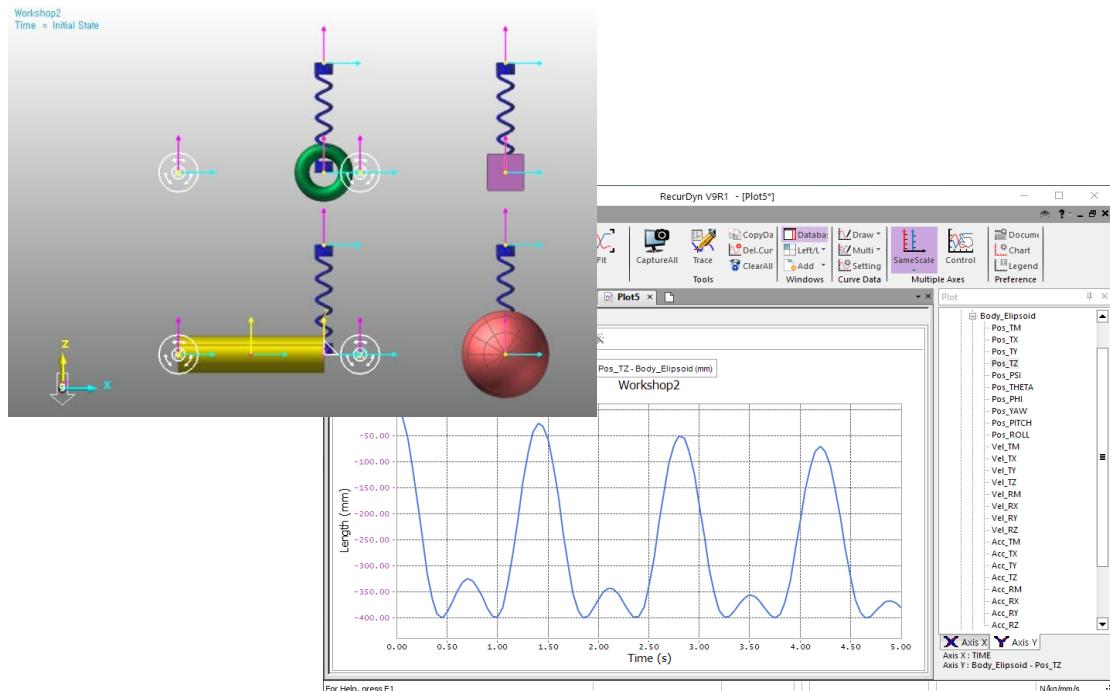
	Last frame	가장 마지막 프레임을 보여주는 버튼
	Record	Animation을 녹화하여 비디오로 저장할 수 있게 하는 버튼
	Animation Scaling	상대적으로 작은 변위를 확대하여 보이게 하는 기능
	Select camera	Animation 재생 시 Camera 시점을 선택할 수 있도록 하는 기능
	Animation Control Configuration	Animation 재생 시 작동구간 및 속도 그리고 반복횟수 등을 설정하는 기능

Workshop 3

내용: Chapter 3의 강의에서 배운 Postprocessor의 사용법을 익히고, Plot과 Animation파일을 출력하고 추가적으로 Data Extract기능을 익힌다.

본 워크샵을 통해 아래의 관련기능을 익힐 수 있다

- Plot 생성 방법
- Animation 생성 방법
- Data Extract 방법
- Analysis 기능 사용 방법



수행시간	40분
난이도 Level	1

Workshop 수행을 위해 필요한 사항

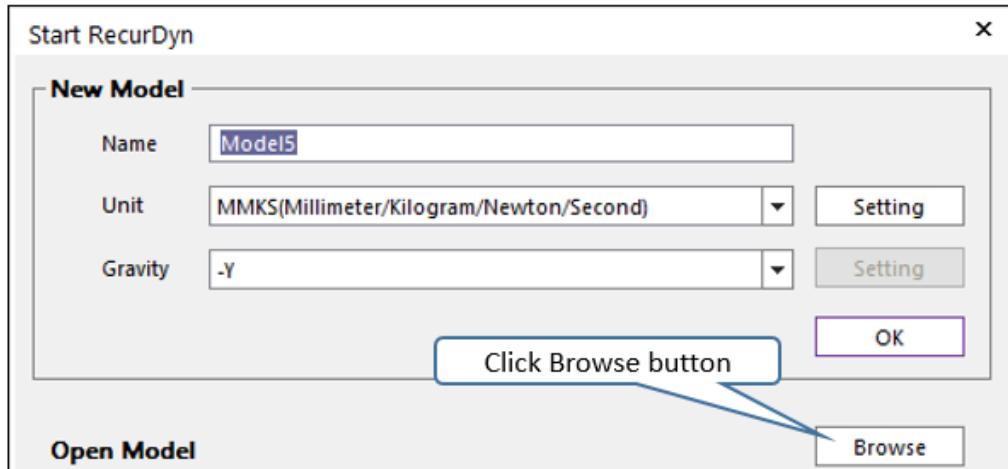
- RecurDyn Professional
- Workshop 2 모델

STEP 1 Workshop3 모델을 불러와 필요한 파라미터를 수정하고 해석을 수행한다.

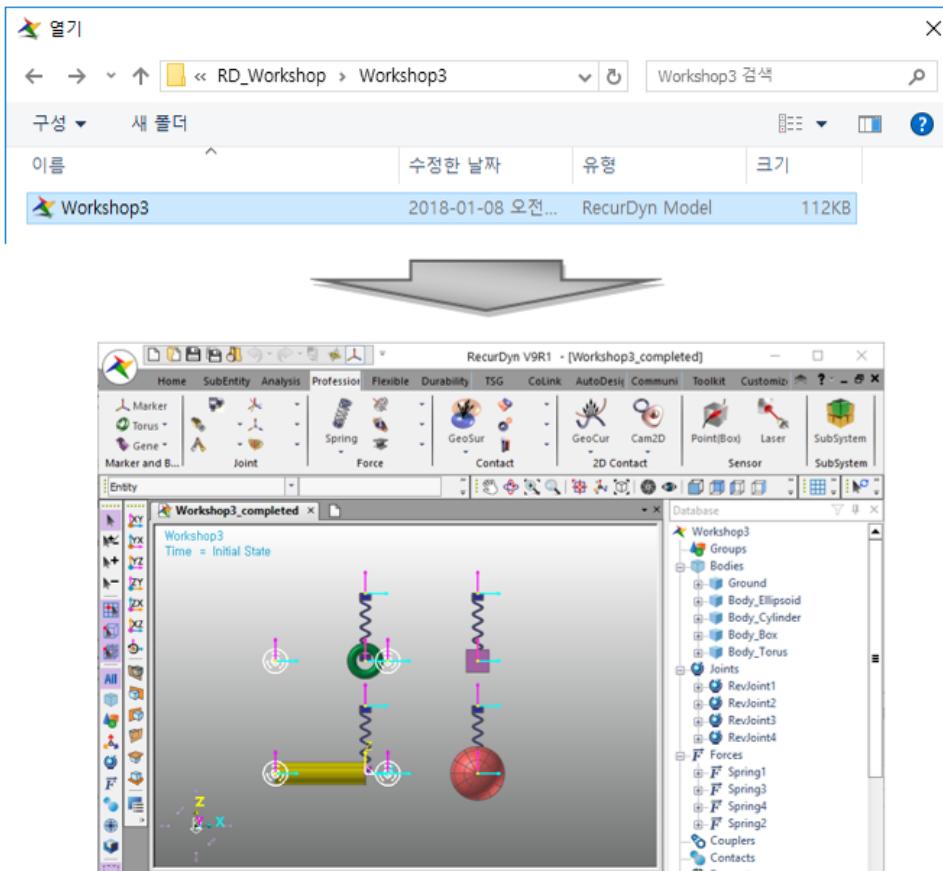
1. RecurDyn 실행

Window의 시작메뉴에서 → 모든 프로그램 → FunctionBay, Inc. → RecurDyn V9R1 → RecurDyn V9R1 실행

2. Start RecurDyn창에서 Open Model의 Browse 버튼을 누른다



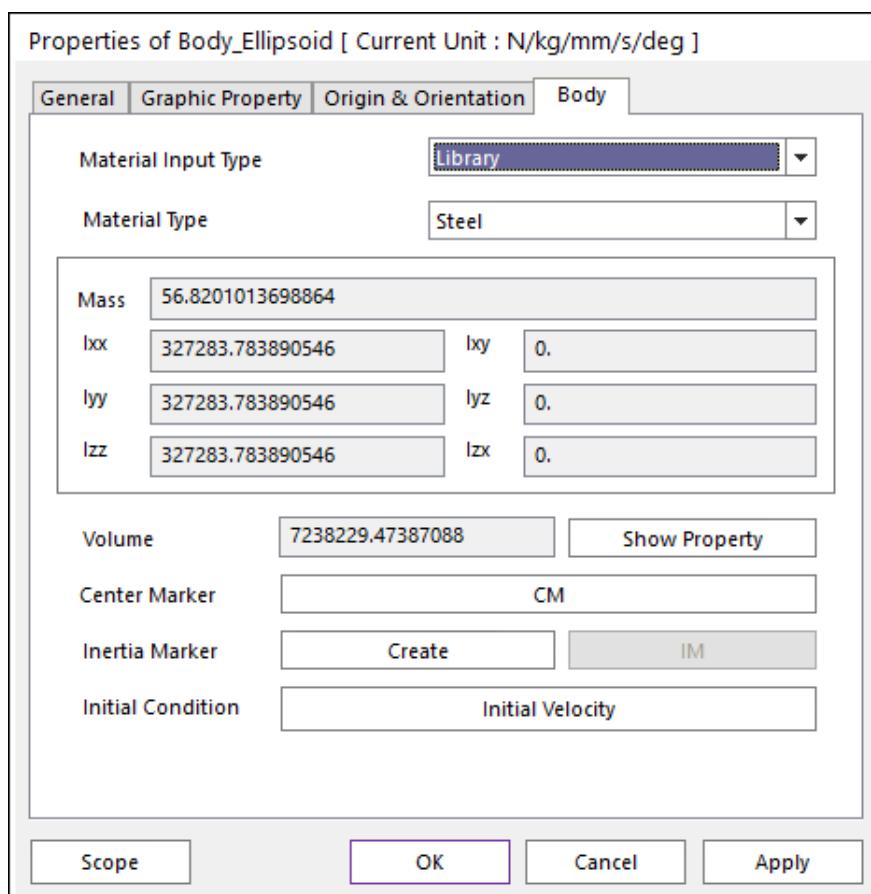
3. 탐색창이 나타나면 Workshop3.rdyn파일을 선택한 후 열기버튼을 누른다



※ Workshop3 모델은 Workshop2에서 작업을 통해 생성한 모델과 동일하다. 이 모델은 각기 다른 형태의 Geometry를 이용하여 하나의 Body와 하나의 Joint 그리고 하나의 Force 요소로 연결된 4개의 동역학 모델이 하나의 공간에 존재하는 것과 같다. 모델에 보이는 4개의 body는 모두 다른 형상을 가지고 있지만, 물리적 성질인 질량과 관성모멘트를 동일한 값으로 사용할 경우 같은 동적 응답을 나타낸다. 이를 확인하기 위해 각 Body의 질량과 관성모멘트의 값을 동일하게 설정하고 해석을 수행하여 본다.

STEP 2 각 Body의 질량, 관성 모멘트의 값 그리고 CM의 위치를 동일한 값으로 수정

1. Database창에서 Body_Ellipsoid를 선택하고 ‘P’버튼을 눌러 Property창을 연다.



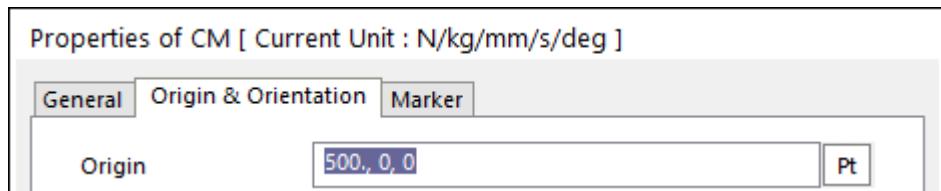
2. Material input Type의 선택메뉴에서 Library를 User Input으로 설정

3. 아래의 입력값과 같이 Mass 및 관성 모멘트(Ixx, Iyy, Izz) 값을 입력

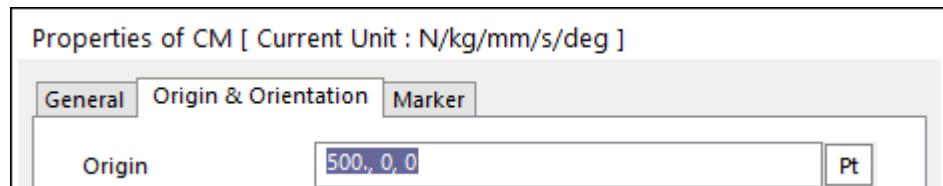
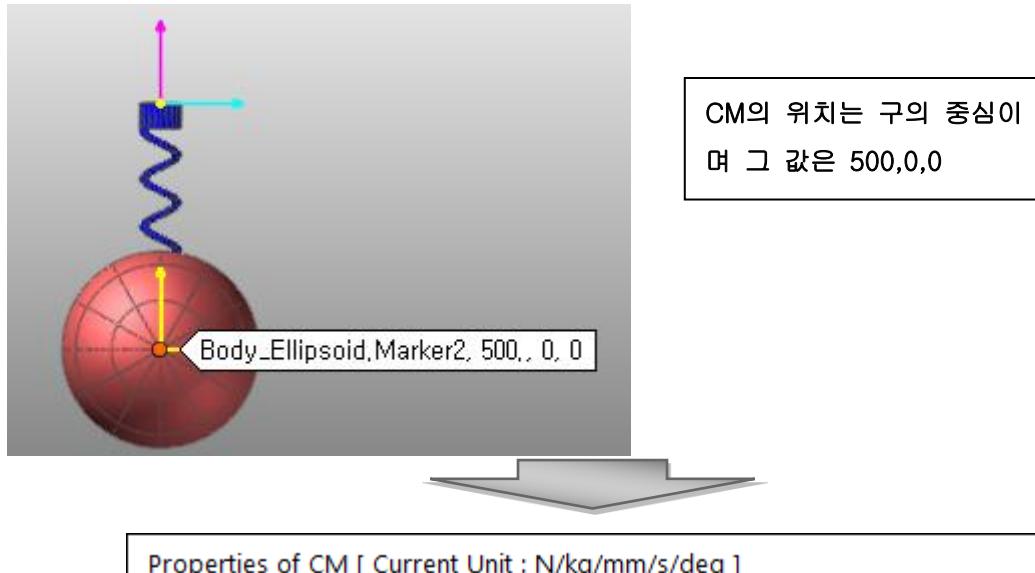
Mass	10		
Ixx	100	Ixy	0
Iyy	100	Iyz	0
Izz	100	Izx	0

4. Apply 버튼을 누름

5. CM 버튼을 누르고 Properties of CM 창이 열림



6. Properties of CM 창에서 Origin의 Pt 버튼을 누른 후 Ellipsoid의 중심 위치를 클릭



7. 입력된 값을 확인 후 Ok & Ok

8. Database 창에서 Body_Cylinder를 선택하고 ‘P’ 버튼을 눌러 Property 창을 연다

9. Material input Type의 선택메뉴에서 Library를 User Input으로 설정

10. Mass 및 관성모멘트(Ixx, Iyy, Izz) 값을 Body_Ellipsoid의 값과 동일하게 입력
(Mass=10, Ixx, Iyy, Izz=100)

11. Apply 버튼을 누름

12. CM 버튼을 누르고 Properties of CM 창이 열림

13. Properties of CM 창에서 Origin의 값을 0, 0, 0으로 입력

14. 입력된 값을 확인 후 Ok & Ok

15. Database창에서 Body_Box를 선택하고 ‘P’버튼을 눌러 Property 창을 연다

16. Material input Type의 선택메뉴에서 Library를 User Input으로 설정

17. Mass, 관성모멘트(Ixx, Iyy, Izz) 값을 Body_Ellipsoid의 값과 동일하게 입력
(Mass=10, Ixx, Iyy, Izz=100)

18. Apply 버튼을 누름

19. CM 버튼을 누르고 Properties of CM 창이 열림

20. Properties of CM 창에서 Origin의 값을 500, 0, 500으로 입력

21. 입력된 값을 확인 후 Ok & Ok

22. Database창에서 Body_Torus를 선택하고 ‘P’ 버튼을 눌러 Property 창을 연다

23. Material input Type의 선택 메뉴에서 Library를 User Input으로 설정

24. Mass, 관성모멘트(Ixx, Iyy, Izz) 값을 Body_Ellipsoid의 값과 동일하게 입력
(Mass=10, Ixx, Iyy, Izz=100)

25. Apply 버튼을 누름

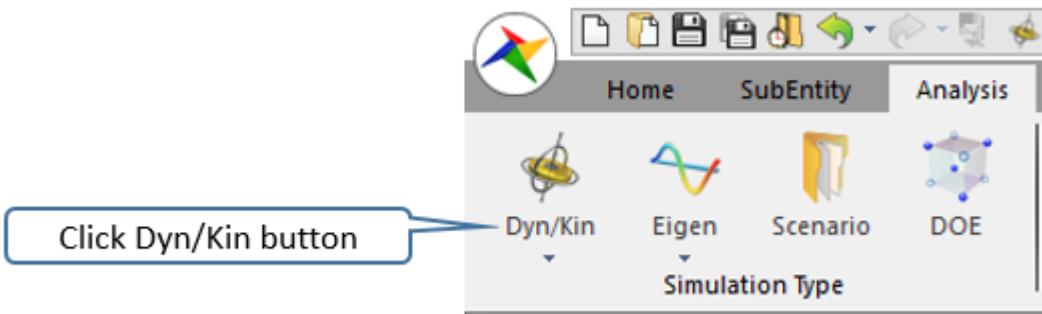
26. CM 버튼을 누르고 Properties of CM 창이 열림

27. Properties of CM 창에서 Origin의 값을 0, 0, 500으로 입력

28. 입력된 값을 확인 후 Ok & Ok

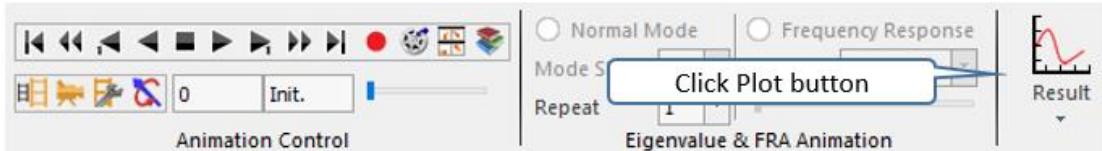
STEP 3 Analysis 수행 후 Postprocessor 실행

1. Analysis Tab 메뉴를 클릭 후 Dyn/Kin 버튼을 누른다



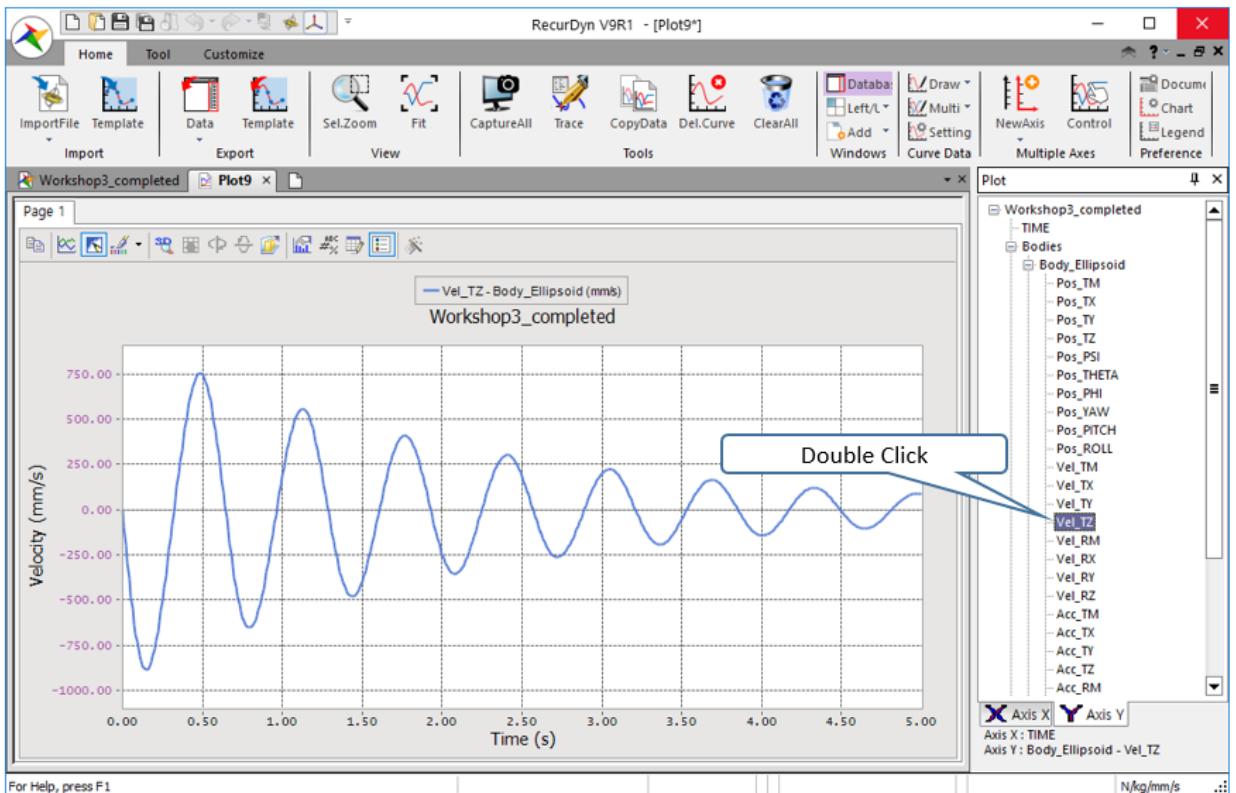
2. Dynamics/Kinematic Analysis 창이 뜨면 End Time 5, Step 500 입력 후 Simulation 버튼을 누른다.

3. Analysis Tab 메뉴의 Plot_Result 버튼을 눌러 Postprocessor를 수행시킨다.



STEP 4 Database window에서 해석 결과를 선택하여 그래프를 Plot하고 x, y축의 설정과 축 Label 및 Title 변경, Curve의 Legend를 변경

1. Plot Database 창에서 Workshop3/Bodies/Body_Ellipsoid/Vel_Tz 를 선택한 후 더블클릭 한다.

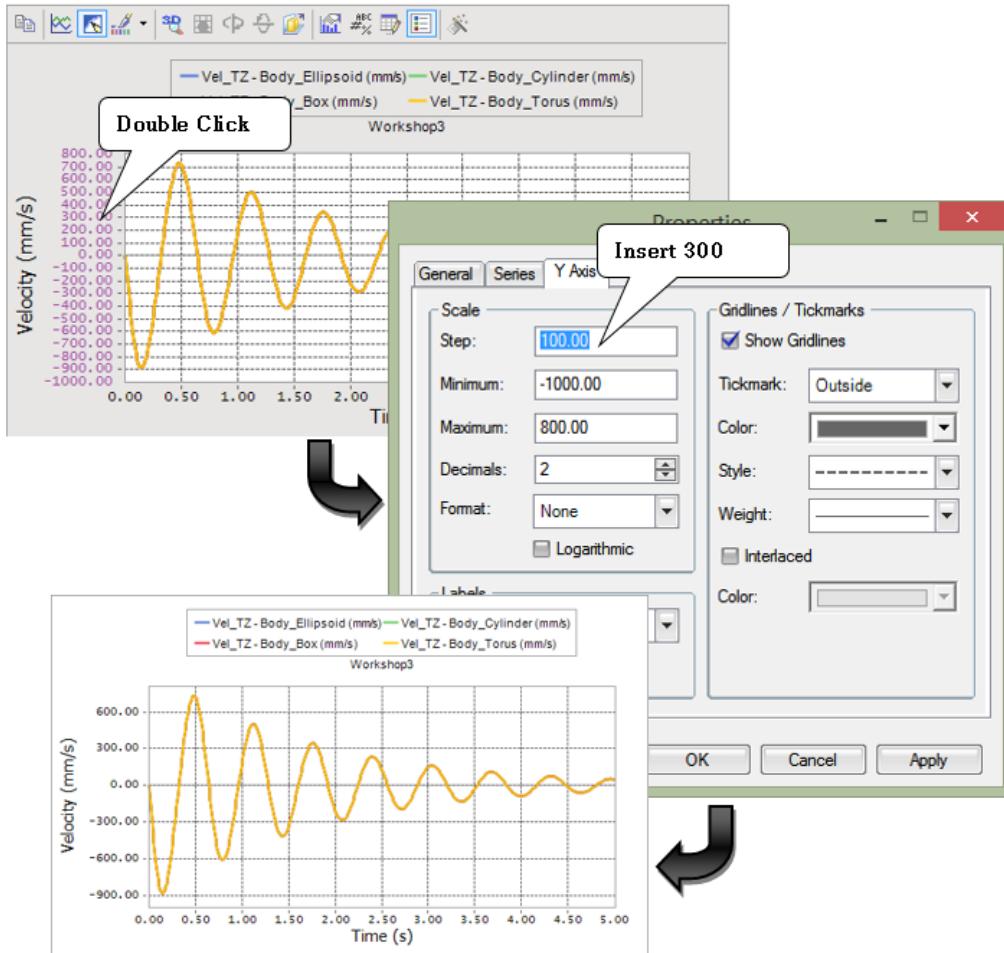


※ 각 Body의 위치, 속도, 가속도 또는 연결된 힘 요소나 Joint에 대한 하중을 그래프로 그려본다. 4개의 Body와 연결된 모든 모델링 요소에 나타나는 값은 모두 동일하다. 본 모델에서 각 Body의 형상(Geometry)은 모두 달랐지만 질량과 관성모멘트의 값을 동일하게 할 경우 Body의 물리적 성질이 동일함을 알 수 있다. 즉, Body의 형상에 대한 정보는 동역학적으로 볼 때 물체의 본질이 아니며, 이러한 형상적 물리량은 질량과 관성 정보에 이미 포함되어 있다고 할 수 있다. 단, Body의 형상 정보는 향후 접촉모델이 적용될 경우에 수학적으로 매우 중요한 의미를 가진다.

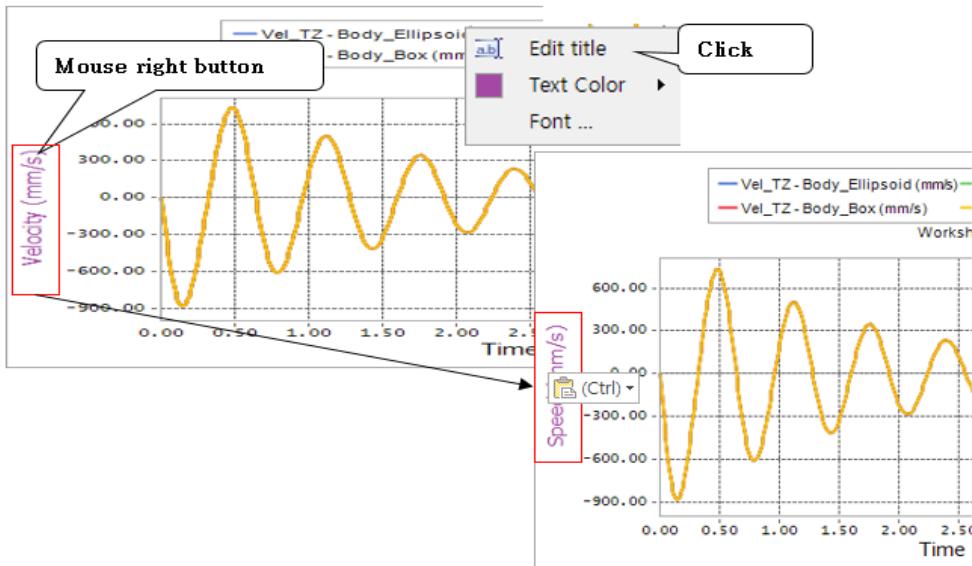
2. Plot Database 창에서 아래의 데이터를 찾아 동일한 Page에 Plot한다.

Workshop3/Bodies/Body_Torus/Vel_Tz
Workshop3/Bodies/Body_Cylinder/Vel_Tz
Workshop3/Bodies/Body_Box/Vel_Tz

3. Plot 창에서 y축의 수치를 더블 클릭하면 Axis Property 창이 나타나고, Step의 값을 300 으로 수정 후 Ok

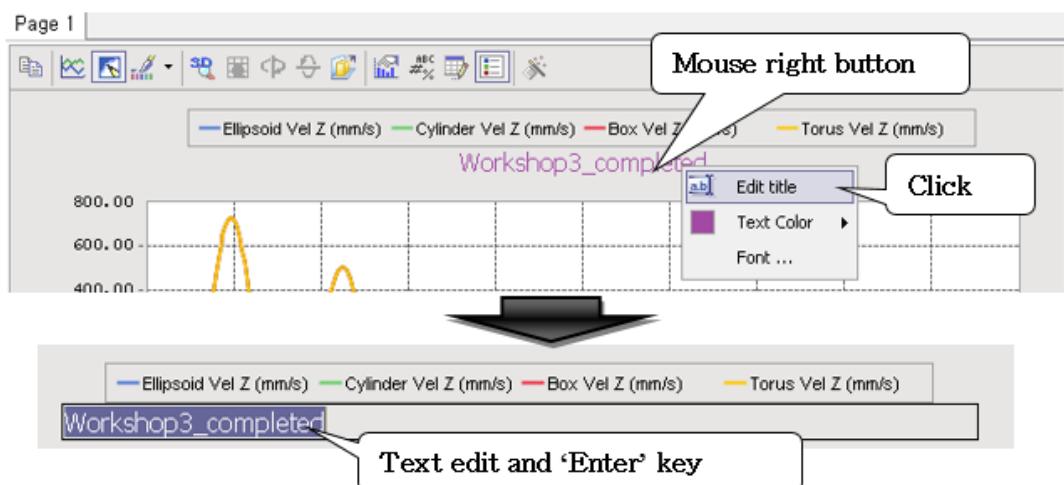


4. Plot 창에서 y축의 Label 글자 위에서 마우스 오른쪽 버튼을 누른 후 Edit Title 메뉴를 선택하면 Label의 Text 수정 상태로 변하여, Text의 내용을 Speed(mm/s)로 수정하고 Enter



5. Page의 Title을 변경하기 위해 Title 글자위에 마우스 오른쪽 버튼의 메뉴를 이용해 Edit

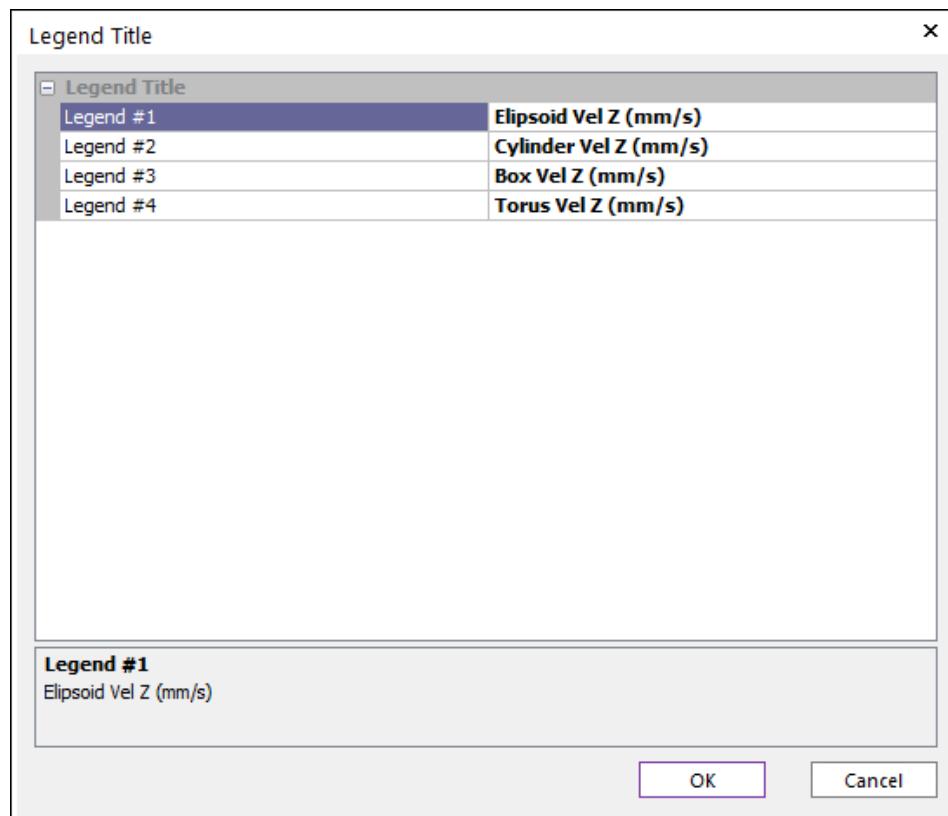
Title 메뉴를 선택하면



6. Legend Title 버튼을 눌러 Legend 편집 창이 나타나도록 한다

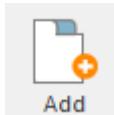


7. Legend 편집 창에서 각 Legend의 값을 아래와 같이 설정



STEP 5 새로운 Page를 생성하고 다른 데이터를 그래프로 나타내고 Animation과 함께 동영상으로 확인

1. Add 버튼을 눌러 새로운 Page를 생성한다



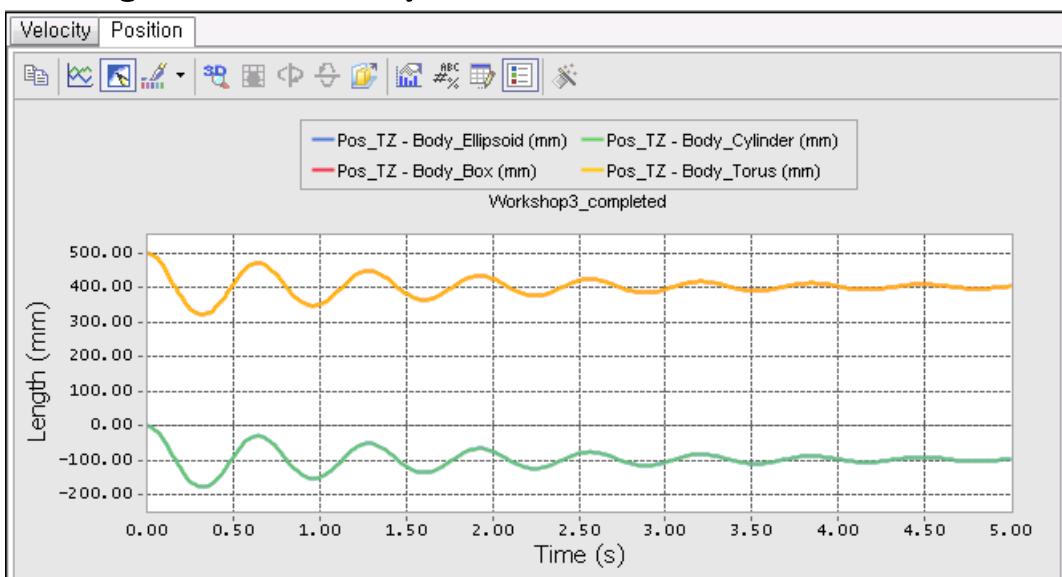
2. Plot Database 창에서 아래의 데이터를 찾아 동일한 Page에 Plot한다.

Workshop3/Bodies/Body_Ellipsoid/Pos_Tz
Workshop3/Bodies/Body_Torus/Pos_Tz
Workshop3/Bodies/Body_Cylinder/Pos_Tz
Workshop3/Bodies/Body_Box/Pos_Tz

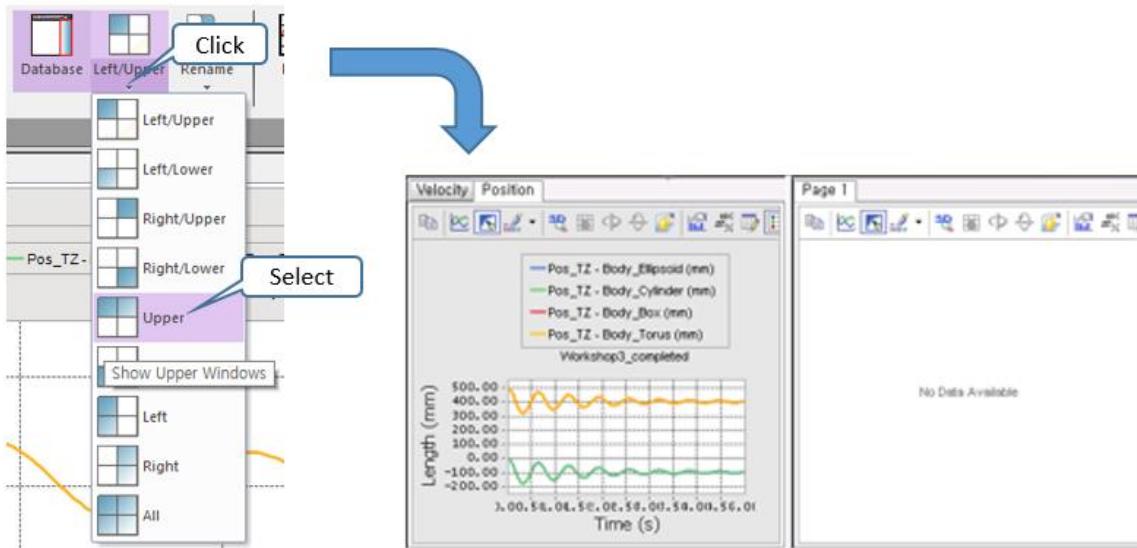
3. Rename 버튼을 눌러 Page의 이름을 'Position'으로 수정한다



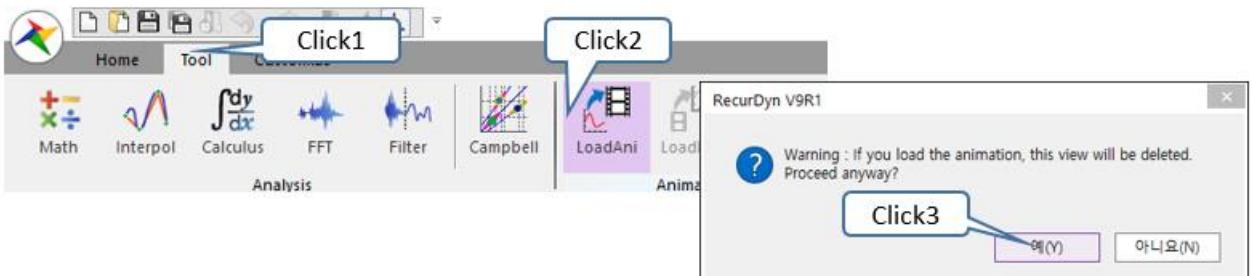
4. 이전 Page의 이름은 'Velocity'로 수정한다



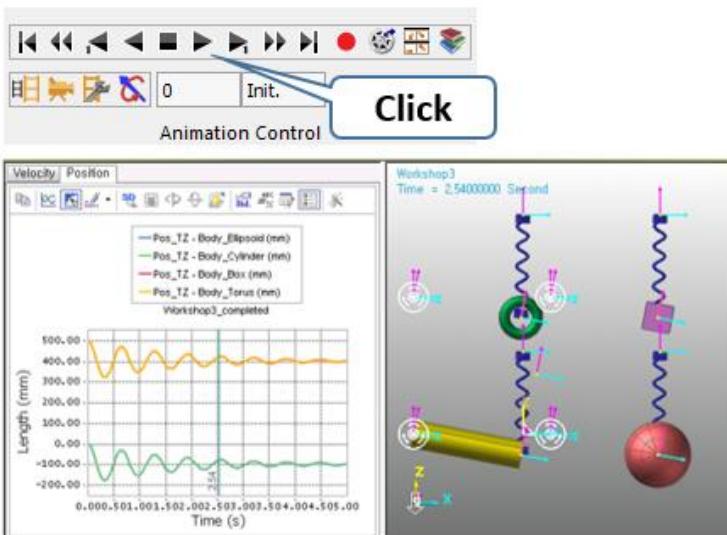
5. ‘Position’ page를 선택하고 Window 버튼을 눌러 2개의 Plot 창이 나타나도록 한다.



6. ‘Page 1’을 선택한 상태에서 Tool Tab을 선택하고 Load Animation 버튼을 눌러 빈 페이지에 Animation을 불러온다.



7. Animation01 Load된 창을 원하는 화면으로 설정 후 Play 버튼을 눌러 동영상과 Plot0이 연동되어 나타나는 결과를 확인한다

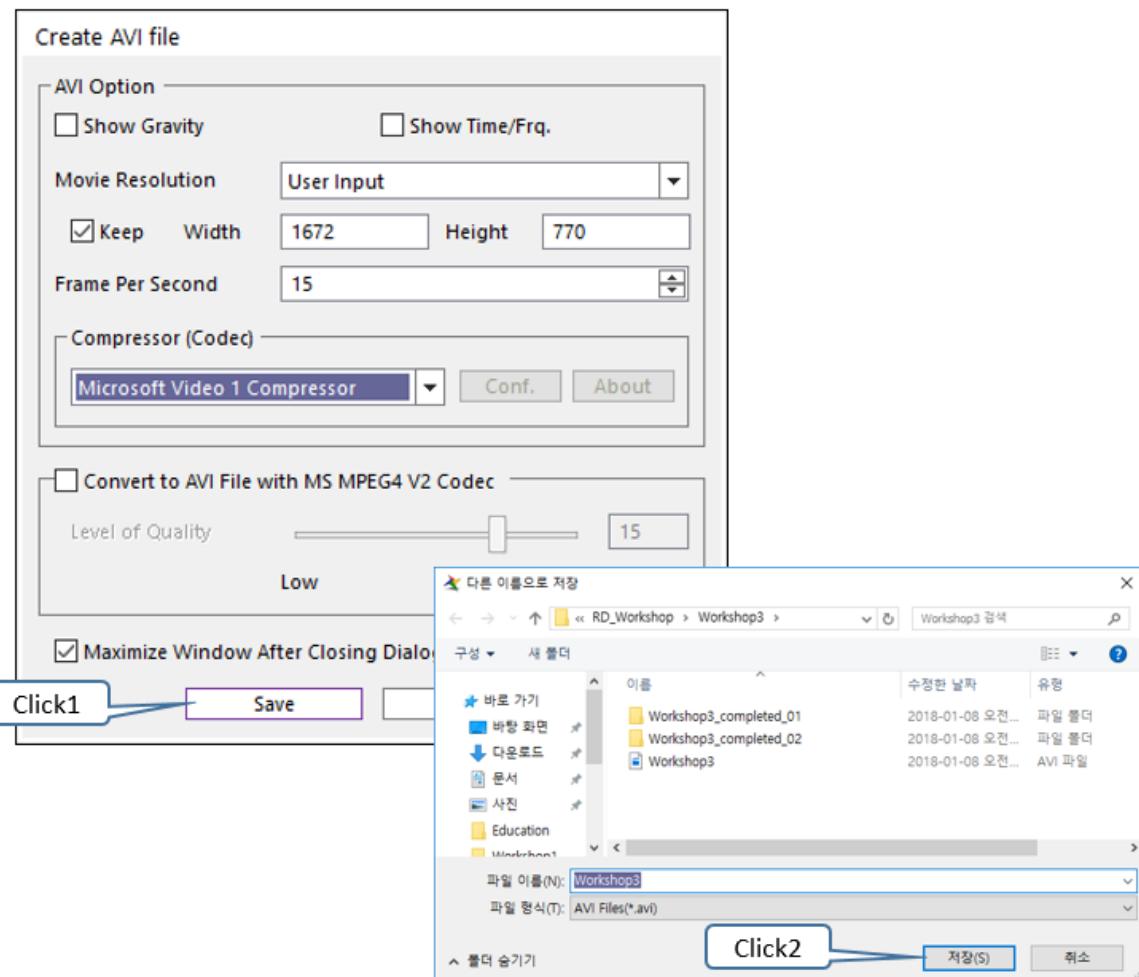


STEP 6 Page에 표시된 Animation과 Plot을 함께 avi파일로 출력

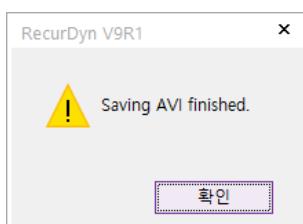
1. Tool tab의 Animation Control 메뉴에서 Record 버튼을 누른다



2. Create Avi file 창이 뜨면 각종 설정을 확인한 후 Save 버튼을 누른 후 파일명과 경로를 지정하고 저장 버튼을 클릭한다.

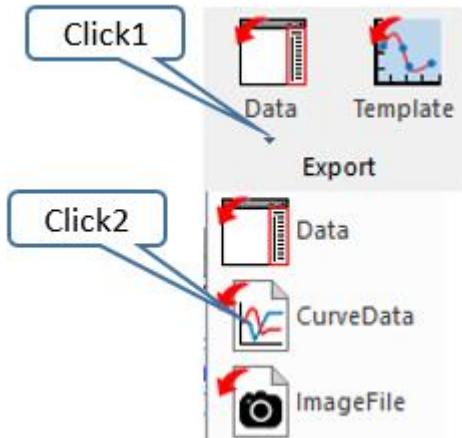


3. 동영상이 생성되면 Saving AVI finished 메시지가 뜨고 확인 버튼을 누르면 작업 완료 된다.

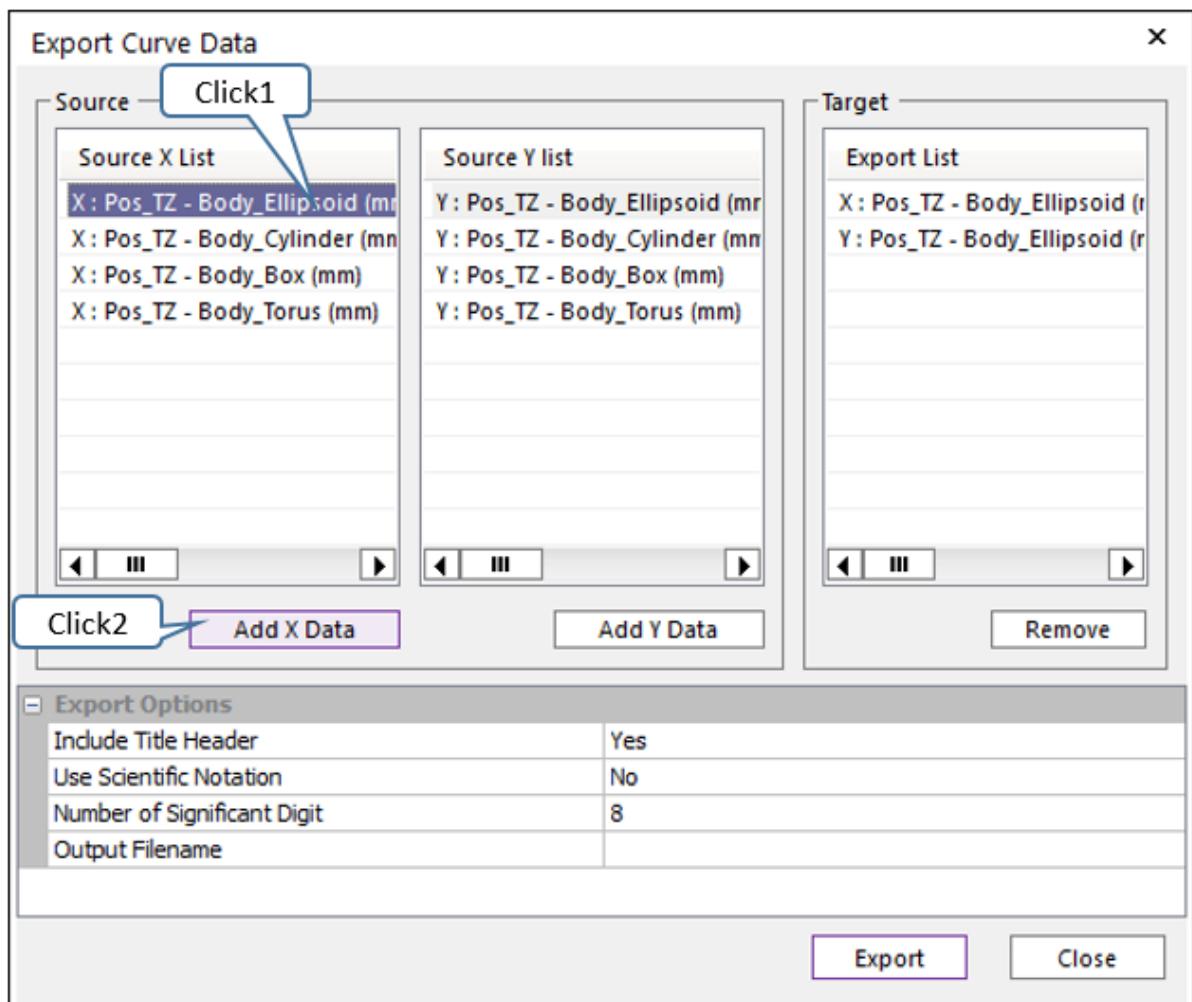


STEP 7 Plot data와 simulation data를 Export

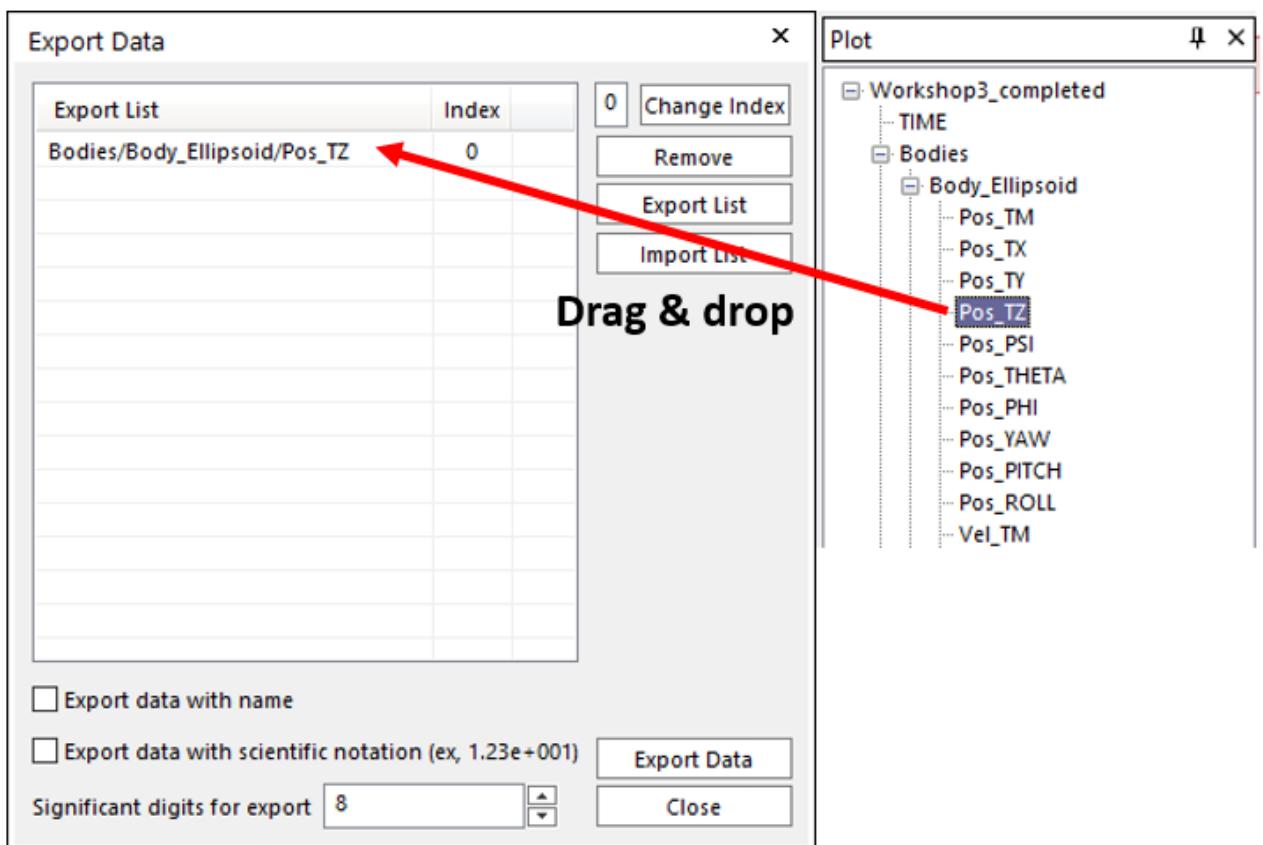
1. ‘Position’ page를 마우스로 클릭한다
2. Export 메뉴에서 Export Curve Data를 선택



3. ‘Export Curve Data’ 창이 뜨면 원하는 데이터를 선택 후 ‘ADD’ 버튼을 눌러 Export List에 등록한다.



4. ‘Export’ 버튼을 누르면 파일저장 창이 나타난다. 그리고 파일명과 경로를 입력한 후 Save 버튼을 누르면 그래프의 데이터가 Text 파일로 저장됨
5. Export 메뉴에서 Export Data를 선택
6. Export Data 창이 뜨면 Plot Database 창에서 원하는 데이터를 선택한 후 Drag하여 Export List로 Drop한다.
7. ‘Export’ 버튼을 누르면 파일저장 창이 나타난다. 그리고 파일명과 경로를 입력한 후 Save 버튼을 누르면 그래프의 데이터가 Text파일로 저장됨



※ Export Data기능은 해석결과를 다른 프로그램에서 그려보거나 데이터를 이용하여 다른 해석에 사용하기 위해 반드시 필요한 기능이다. Export된 데이터는 ASCII 데이터 파일이다. .

Chapter 4. Rigid Body, Marker and Geometry

Lecture:

3차원 공간에 다물체 시스템을 모델링하기 위한 기본적인 개념인 위치와 자세에 대한 입력방법과 Body, Marker 그리고 Geometry의 종류 및 생성방법을 익힌다.

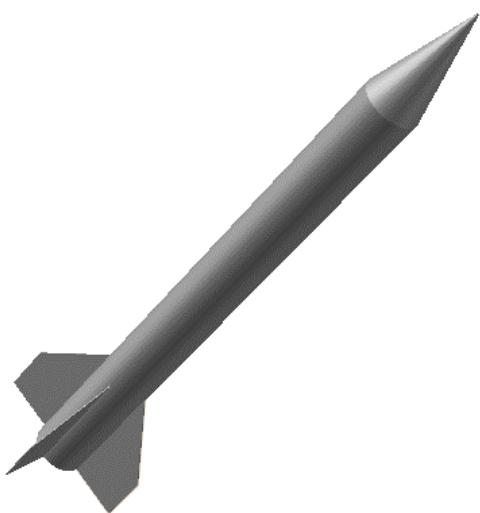
Workshop

Geometry를 이용한 로켓 모델링 및 초기속도를 이용한 발사 시뮬레이션을 수행하고 로켓의 속도와 궤적을 그래프로 그려본다



소요 시간

강의명	시간(분)
중력장에서 강체의 운동 및 Body, Marker 그리고 Geometry	30 분
Rocket modeling Workshop	30 분
총합	60 분



1. Origin (Location) and Orientation

Origin과 Orientation은 3차원 직교 좌표계에서 해당 Body 또는 Marker의 위치와 자세를 정의하기 위한 기본적인 정보이다. Origin과 Orientation을 입력하는 대상은 여러 가지가 있을 수 있지만, MBD 기본적인 요소에 대한 관점에서 정의하면 대표적으로 그림과 같이 BODY, MARKER 그리고 GEOMETRY에 대해 입력해야 한다.

RecurDyn에서 위치 및 자세와 관련된 모든 입력은 그림과 같이 동일하거나 유사한 형태로 Origin과 Orientation에 대한 입력을 기본적으로 사용한다.

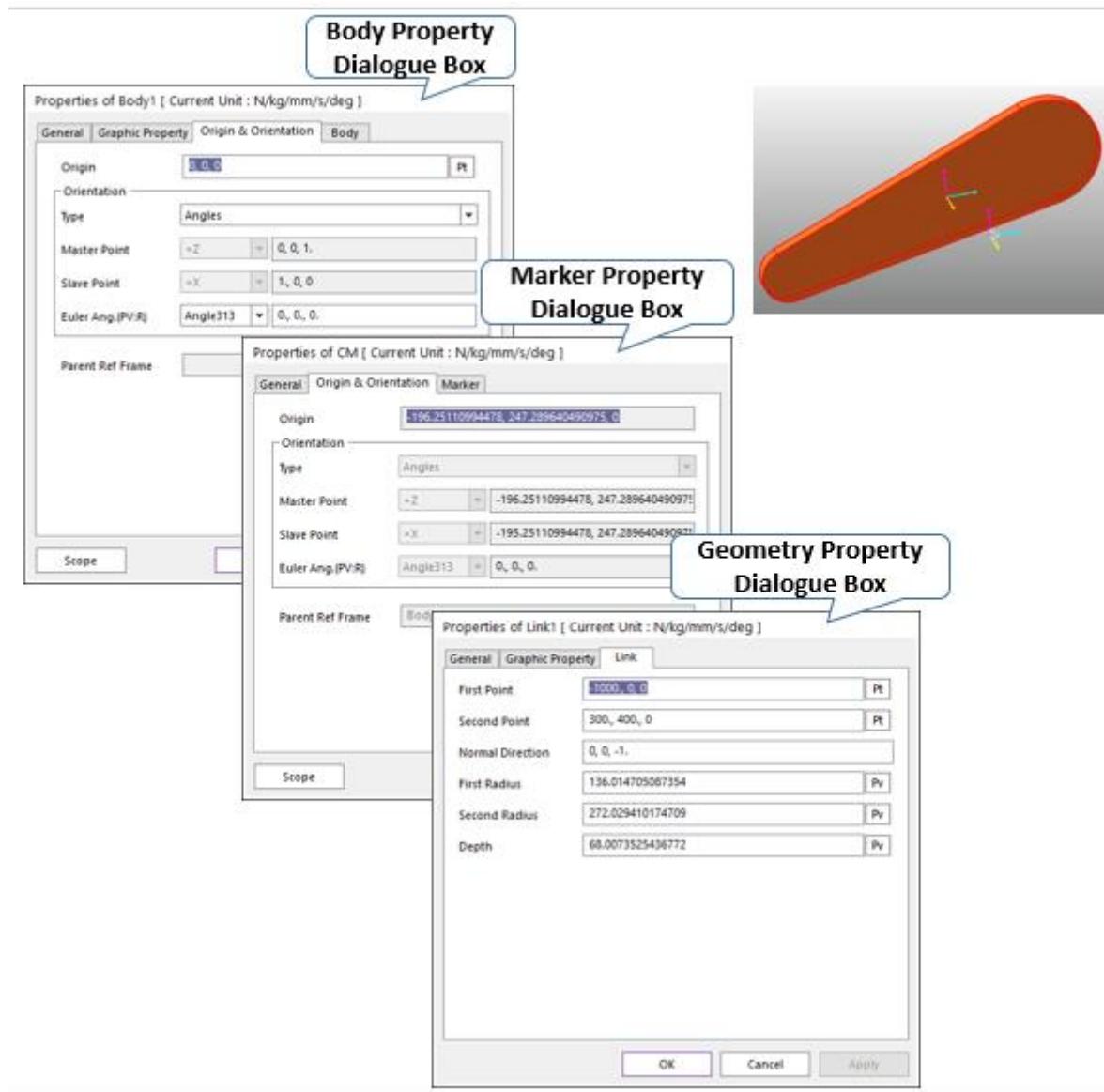


Figure 31 Origin 및 Orientation 입력 창과 RecurDyn Entity

1) Origin (Location)

공간상의 모든 물체는 위치와 자세를 가진다. 위치는 직교 좌표계(Cartesian coordinate)로서 x, y, z 축 방향의 변위로 표현된다. 이는 매우 직관적이고 일반적인 표현방법으로서 쉽게 이해할 수 있다. 서로 직교인 세 축 방향의 값만 알면 물체의 위치를 정의할 수 있으며, RecurDyn에서는 모든 Entity의 위치정의에 대해 직교 좌표계를 사용하고 있다.

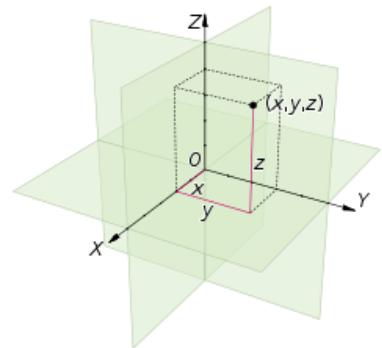


Figure 32 직교 좌표계의 위치

단, 전역(Global) 좌표계와 지역(Local) 좌표계에 대한 개념만 알도록 하자.

전역 좌표계: 물체의 위치와 자세를 표현함에 있어 단 하나의 좌표계 즉, 전역 원점을 사용하여 나타내는 방법으로서 기준이 하나인 만큼 좌표를 확인할 때 보다 직관적임

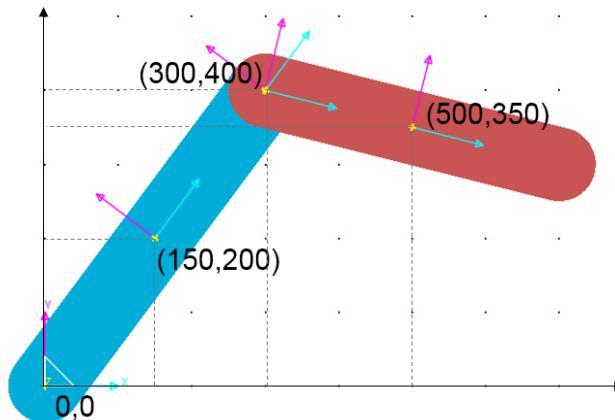


Figure 33 전역 좌표계 위치 표현방법

지역 좌표계: 물체의 위치와 자세를 표현함에 있어 기준이 되는 다른 좌표계를 참조하는 방법으로서 순차적인 연결상태의 모델링에 편리하지만 직관적이지 않음

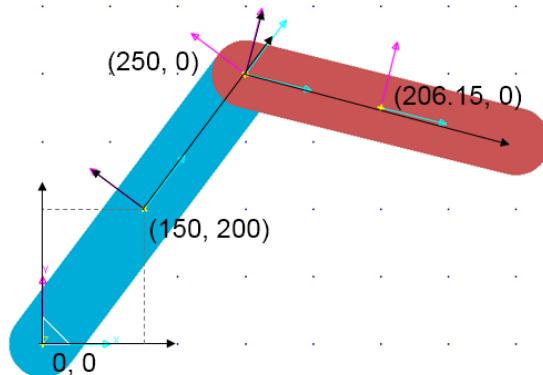


Figure 34 지역 좌표계 위치 표현방법

2) Orientation

(1) Angle Input

사용자 관점에서 이해하기 어려운 요소가 바로 자세(Orientation)이다. 물체가 공간에 위치할 때 어떠한 자세로 있는지를 결정하는 것이 바로 자세이다. 물체의 자세를 나타내는 전통적인 방법은 방향 cosine이며 이 방법은 9개의 변수를 필요로 한다. 반면 Orientation 방법은 물체를 각 축을 중심으로 필요한 만큼 회전시켜 원하는 자세를 만들 수 있다. 그리고 축의 회전방법으로는 직교좌표상의 서로 다른 3축을 순서대로 한번씩 회전시키는 방법(Bryant angle)과 서로 다른 두 축을 2번, 한번 회전시키는 방법(Euler angle)이 있다.

RecurDyn은 물체의 자세를 정의하기 위해 기본적으로 Euler angle법을 사용한다. 그러나 사용자의 편의를 위해 Bryant angle법 또한 지원한다. 사용자는 상황에 맞도록 적절한 방법으로 물체의 자세를 정의하면 된다.

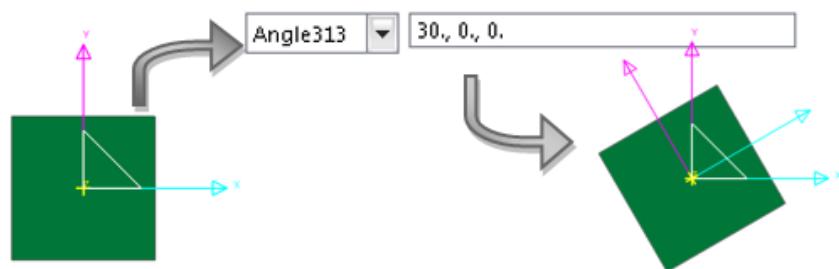


Figure 35 물체의 자세 표현

이해를 돋기 위해 Bryant angle(x-y-z)법과 Euler angle(z-x-z)법에 의한 물체의 자세 정의방법을 다음의 그림에 나타내었다.

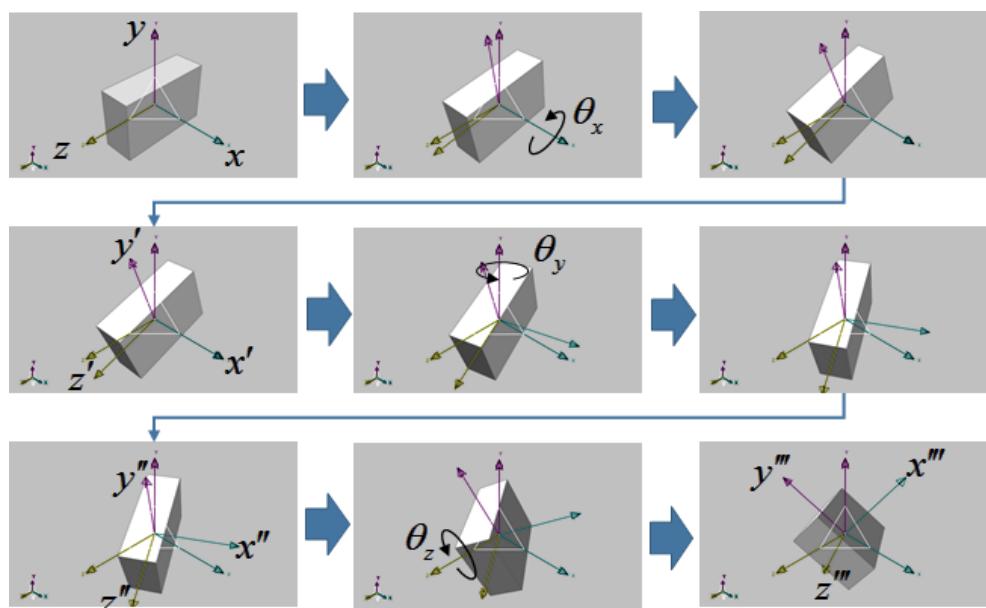


Figure 36 Bryant angle법에 의한 자세 표현

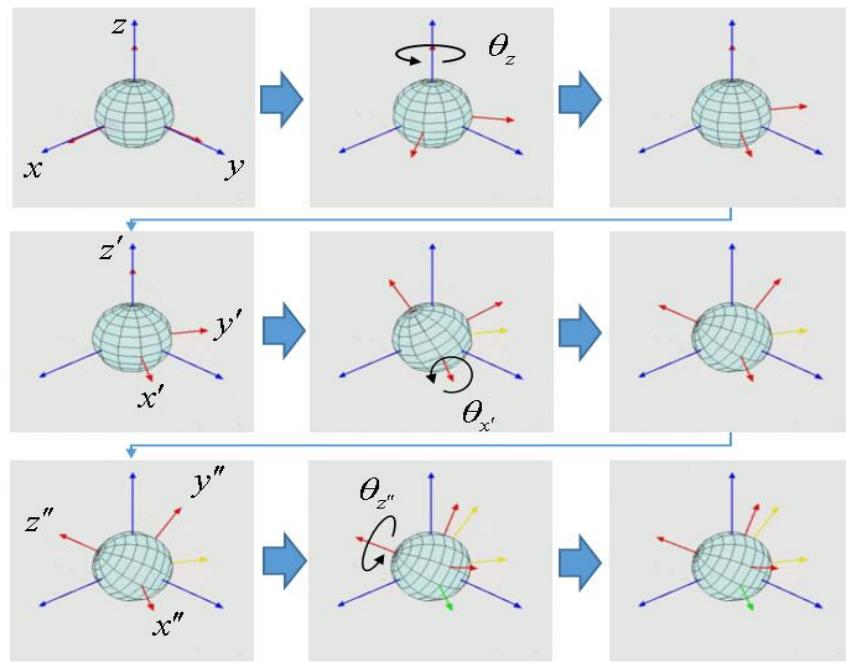


Figure 37 Euler angle법에 의한 자세 표현

(2) Coordinate input

RecurDyn은 자세를 입력하기 위해 추가적으로 Coordinate 입력방법을 제공한다. 이는 Marker의 두 축이 향하는 방향을 다른 좌표를 참조하여 자세를 결정하는 방법으로서 생성방법은 다음 그림과 같다

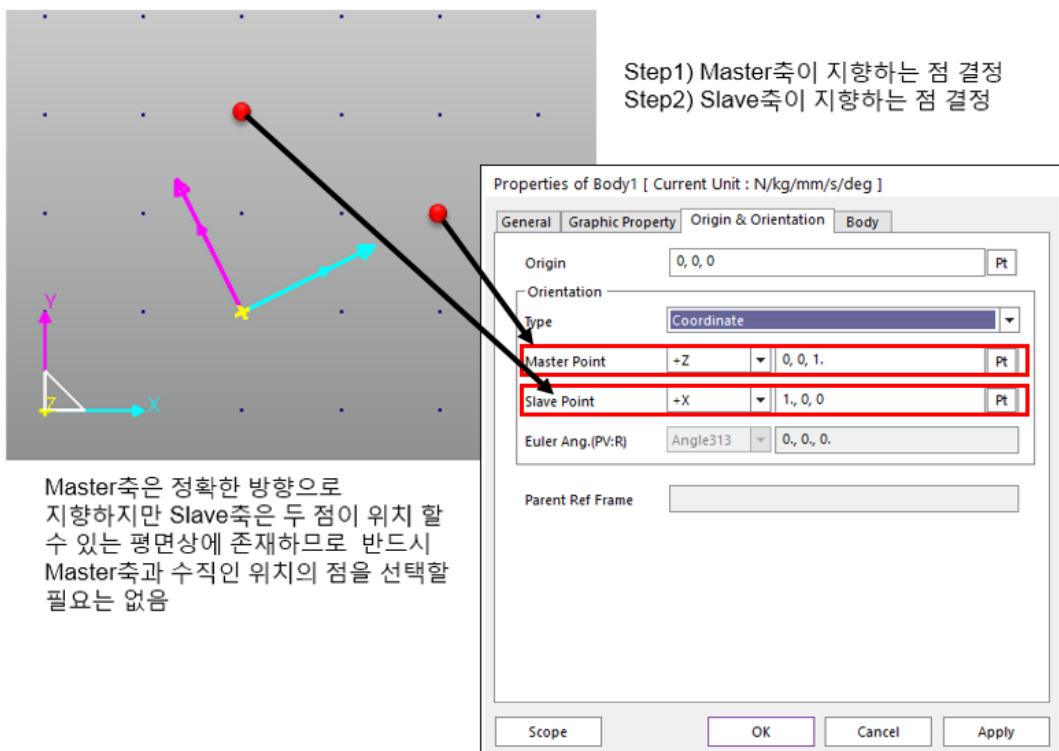


Figure 38 Coordinate 입력에 의한 자세 표현

2. Rigid Body

1) Body 좌표계

RecurDyn에서 Body는 움직이는 독립적인 물체를 의미하며, 부서지거나 변형이 발생하지 않는 강체로 본다. 물론 탄성체 역시 하나의 Body에 속하지만 우선 강체를 기준으로 설명하고자 한다. Body는 위치와 자세 그리고 질량과 관성모멘트라는 속성을 가지며, 종속적인 개체로서 Geometry와 Marker를 가진다.

Body는 전역 좌표계를 사용하여 Body가 가지는 Geometry가 아닌 Body 자체에 대한 좌표를 가지고 있다. 사용자 중에서 간혹 Geometry와 Body를 동일시하는 생각을 가지는 경우가 있지만 이는 잘못된 생각이다. Geometry는 Body에 종속적인 관계일 뿐 Body가 아니다. 아래의 그림은 Body1부터 Body3까지 Body의 좌표를 나타내고 있다. Body 좌표계 위치와 자세를 확인하기 위해서는 해당 Body를 선택하면 Working Window에 붉은색 Wireframe 색상이 Highlight되면서 Body의 좌표계가 화면상에 나타난다.

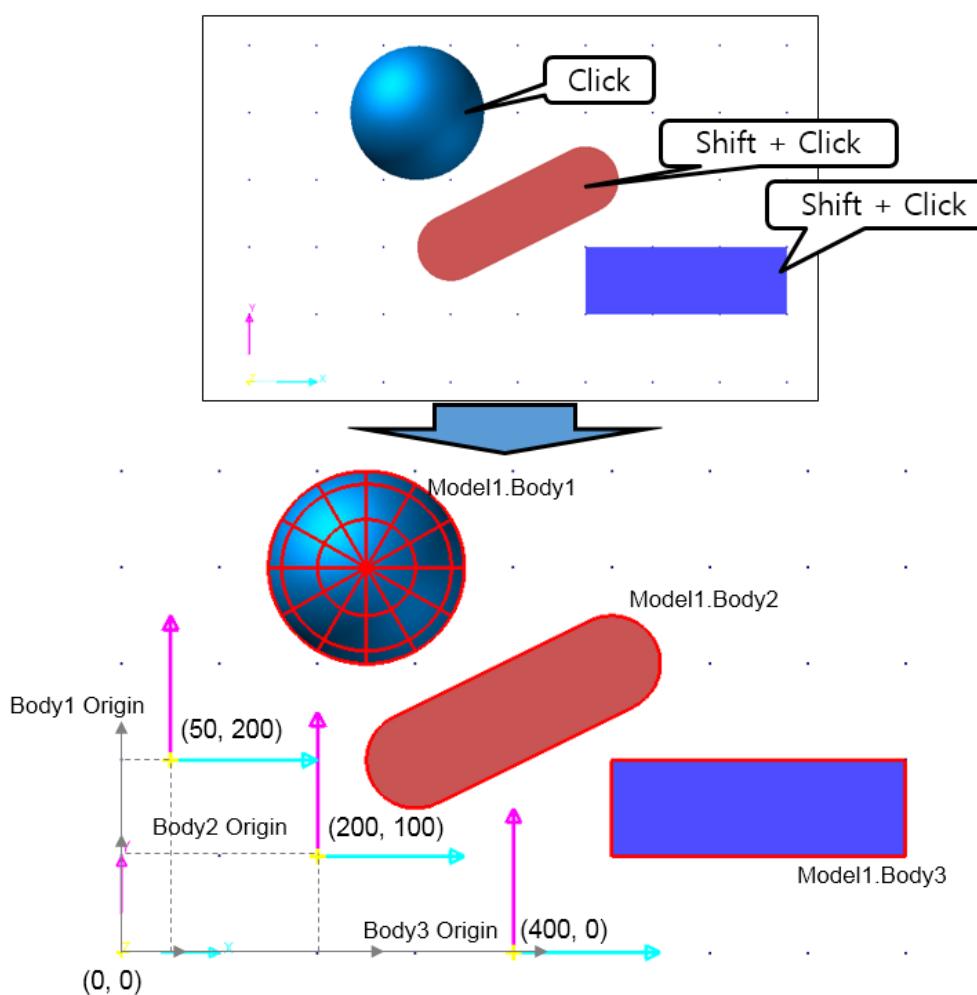


Figure 39 Body의 모델링과 좌표계

2) Body 모델링

Body는 좌표와 함께 Body 자체의 물성치를 정의하는 것이 중요하다. 이미 Body의 물리적 특성 및 필요한 값은 Chapter 1.1의 내용을 통해 이미 설명한 바 있다. 실제 RecurDyn에서 입력하기 위해서는 Body의 Property 창을 통해 설정할 수 있으며 그 과정은 아래의 그림과 같다.

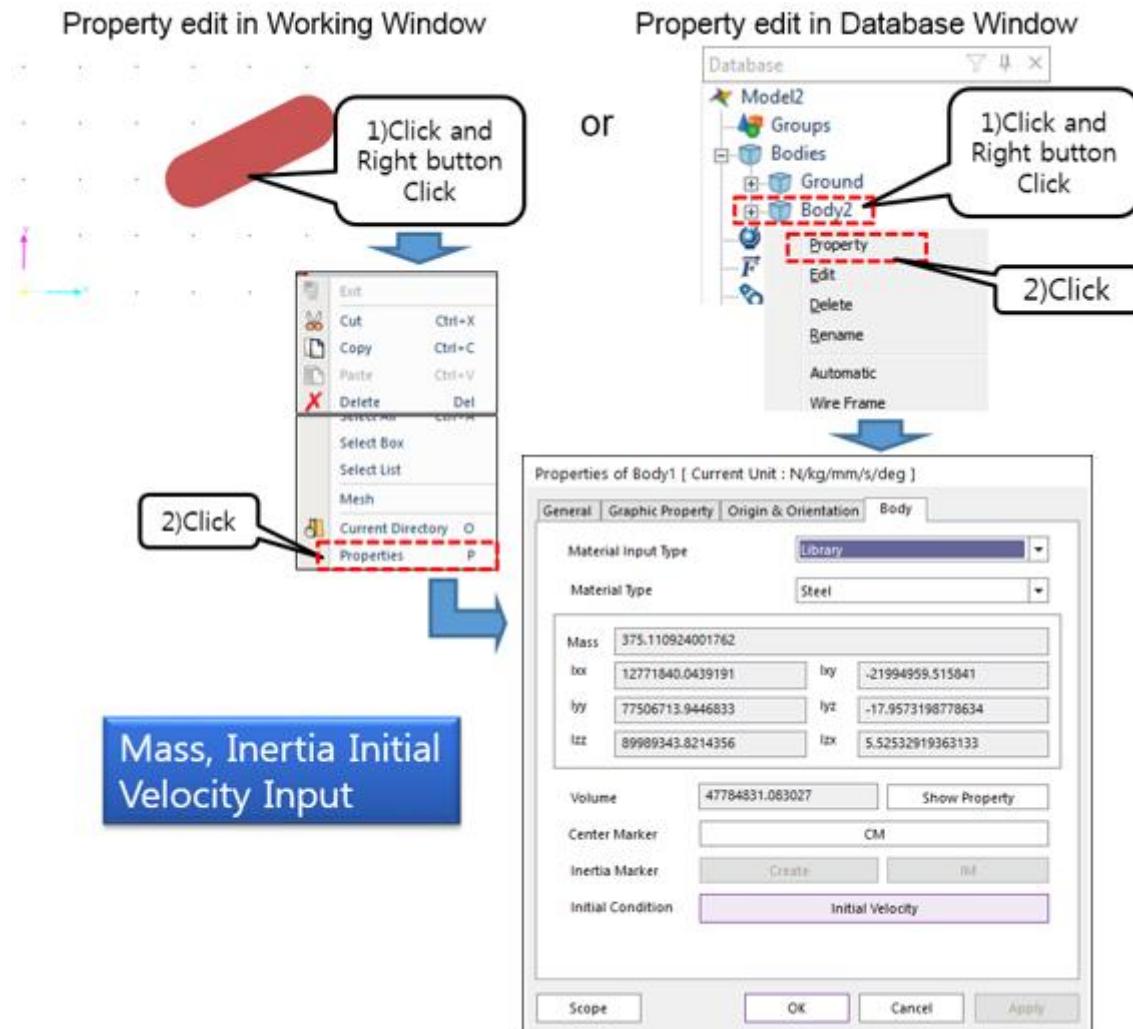


Figure 40 Body의 property 설정

- Material Input Type
 - User Input: Mass 와 Ixx, Iyy, Izz를 모두 사용자가 직접 입력
 - Library: Geometry의 부피에 Material Type에 해당하는 밀도를 사용하여 질량 계산
- Density: 밀도를 직접 입력하여 부피와 함께 질량 계산
- Material Type: RecurDyn의 내부에 저장하고 있는 소재의 물성치를 이용하여 밀도를 입력하는 방법으로서 Steel, Aluminum, Wood 등의 소재 선택 가능
- Show Property: Geometry의 부피정보를 보여줌

- CM: Center of Mass marker의 정보를 보여줌
- Initial Velocity: 해석을 시작하는 순간 Body가 가지고 있는 속도를 입력

3. Marker

Marker는 동역학 모델링에 있어 매우 중요한 역할을 하는 참조개체이다. Marker는 Body에 종속적인 개체로서 Body가 움직이면 Marker는 Body를 따라 움직인다. 또한 Marker는 Body좌표계를 기준으로 위치와 자세를 입력한다. 즉, 모델링 과정에서 Body의 위치와 자세가 바뀌면 Marker도 같이 바뀐다. 따라서 이러한 특성을 정확히 이해하고 작업을 수행해야 정확한 모델링이 가능하다.

1) Marker의 기준 좌표

Marker는 Body에 종속적인 Entity로서 Body 좌표계를 기준으로 Marker의 좌표를 입력한다. 즉, Body 좌표계의 위치가 Global 원점으로부터 이동하여 있거나 회전한 상태라면 Body 좌표를 참조해야만 사용자가 정확한 위치에 Marker를 생성시킬 수 있다.

지역 좌표계의 기준인 Body 좌표계와 marker의 관계를 아래 그림에 보다 자세히 나타내었다.

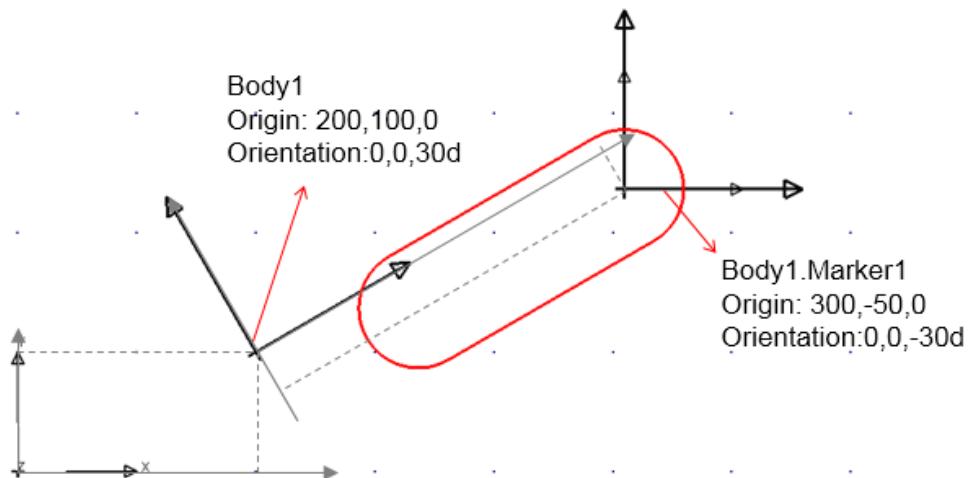


Figure 41 Marker의 좌표 기준

2) Marker의 종류

Marker는 다음과 같이 4가지가 존재한다.

(1) InertiaMarker

Model의 Global 원점에 위치하는 Marker로서 Ground에 종속적이다. 이 Marker는 사

용자에 의한 어떠한 조작도 불가하며 Working Window에서 가시적으로 위치를 확인할 수 있다.

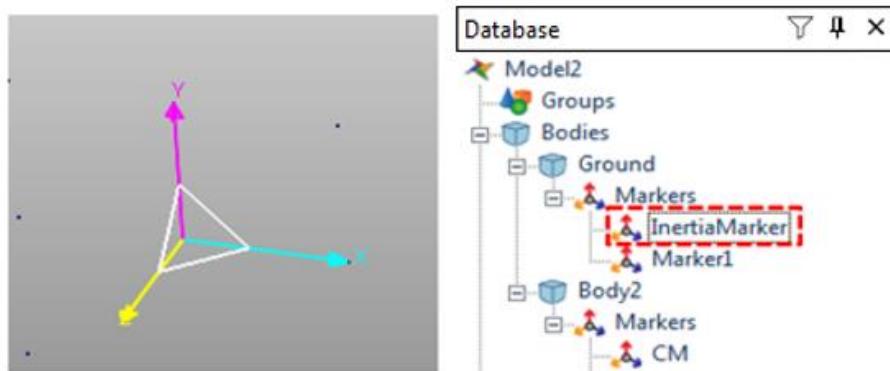


Figure 42 InertiaMarker

(2) CM Marker

Center of Mass marker로서 Rigid Body에 단 한 개만 존재하며 삭제 또는 생성할 수 없다. 즉, Body를 생성하면 자동으로 함께 생성되며 사용자는 위치와 자세를 수정할 수 있으며, Body의 Mass Input Type이 Library 또는 Density로 설정되어 있는 경우 RecurDyn이 자동으로 체적 중심에 위치시킨다. User Input으로 설정할 경우만 사용자가 CM의 위치를 수정할 수 있다.

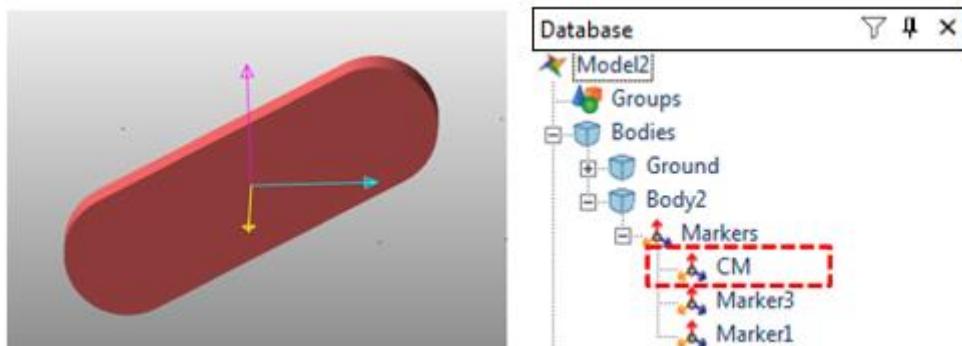


Figure 43 CM Marker

(3) General Marker

모델링을 위한 일반적인 Marker로서 사용자가 임의로 생성 및 삭제 또는 수정할 수 있으며 Joint 또는 Force를 생성하면 자동으로 생성된다.

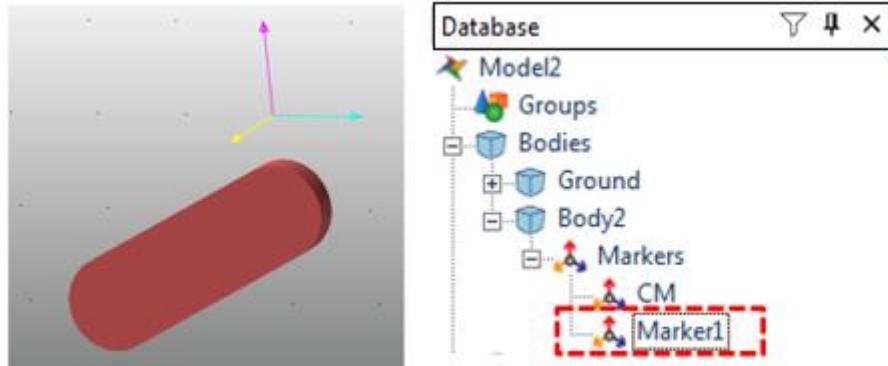


Figure 44 General Marker

(4) Floating Marker

Force 모델링을 위해 사용되는 특수한 Marker로서 GUI 상에 그 차이점을 확인할 수 없지만 Solver에서는 이 Marker에 대한 해석 결과 출력이 불가능하다. 이 Marker는 Translational, Rotational, Screw Force Entity를 생성할 때 Base Body에 만들어지는 Marker이다.

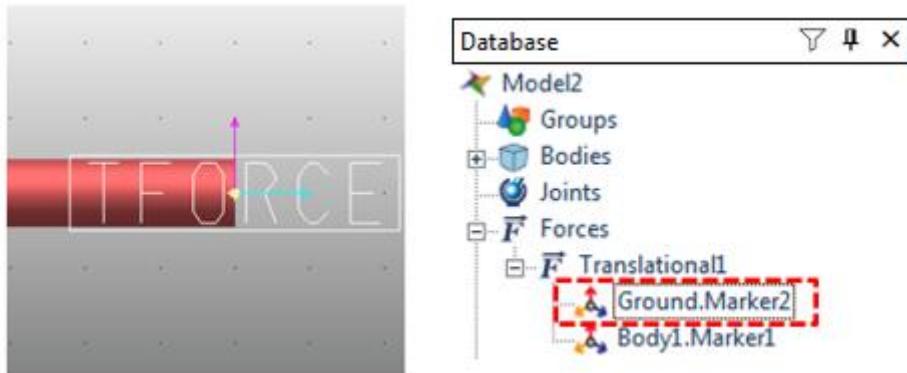


Figure 45 Floating Marker

※ Floating Marker는 Solver만 구분하는 Entity이며 GUI에서는 특별히 구분하지 않는다. 특정한 Force entity를 만들 때 자동으로 생성되지만 이를 위해 사용자가 특별히 대해 신경 쓸 필요는 없다. 그러나 주의할 점은 Floating Marker를 Expression에서 활용 할 수 없다는 것이다. Expression 함수를 사용할 때는 해당 위치의 Marker를 이용할 필요가 있다면, Floating Marker를 이용하지 말고 사용자가 별도의 위치에 Marker를 생성하여 활용하여야 한다.

3) Marker의 생성방법

(1) Joint 또는 Force Entity 생성 시 자동생성

Modeling 과정에서 Joint 또는 Force를 생성하면 General Marker가 자동으로 한 쌍이 만들어진다. 각 Marker는 두 Body사이에 작용하는 구속의 위치 및 방향정보를 Solver로 전달해 주는 역할을 한다. 생성된 Force와 Joint Entity가 반드시 자동으로 생성된 Marker만 참조할 수 있는 것은 아니며 생성된 후 참조Marker를 다른 Marker로 교체 가능하다.

InertiaMarker는 모델이 생성되면 자동으로 만들어지며, CM Marker는 Body를 생성하면 자동으로 생성된다. CM Marker는 교체의 대상이 될 수 없다.

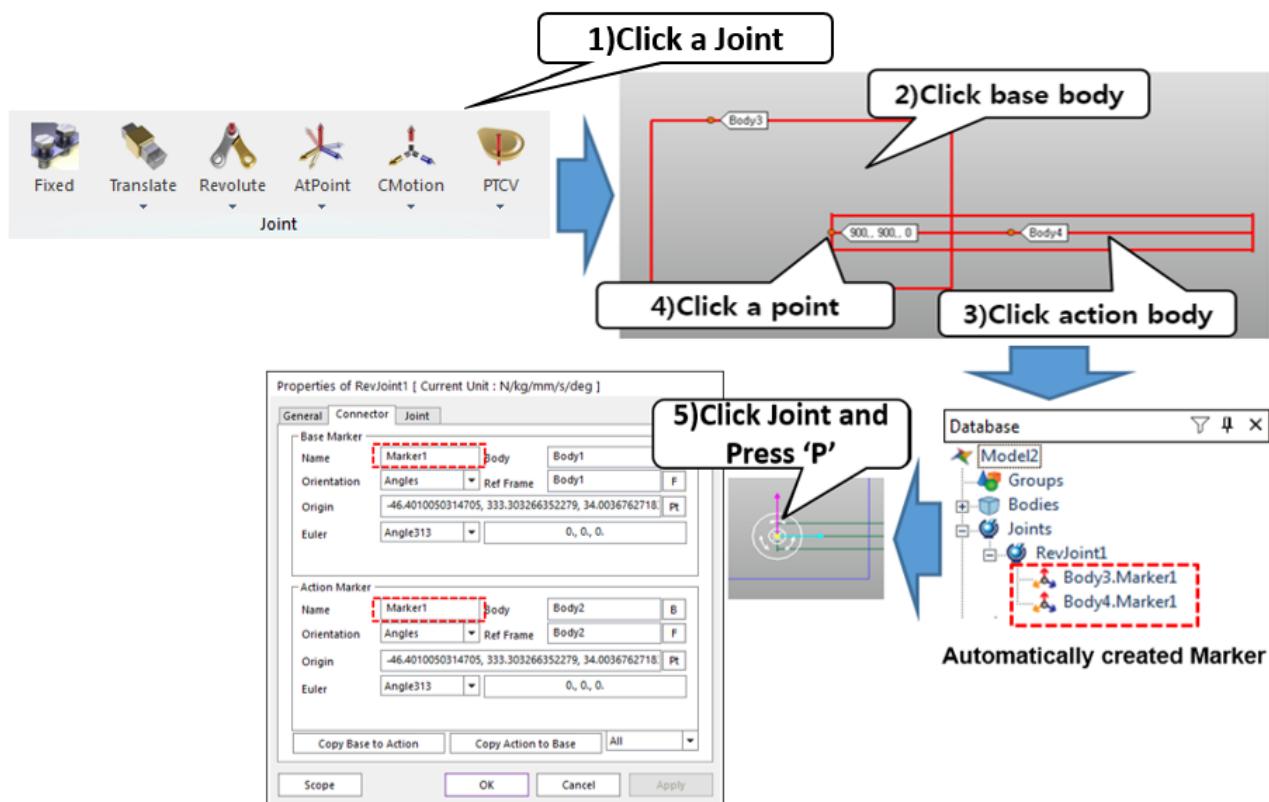


Figure 46 Joint 생성에 따른 자동생성 Marker

(2) 사용자 임의 생성방법

필요에 따라 사용자가 임의 위치에 Marker를 생성할 수 있다. 생성된 Marker는 General Marker로서 Joint, Force 그리고 Request에 입력하거나 Expression에서도 활용할 수 있다.

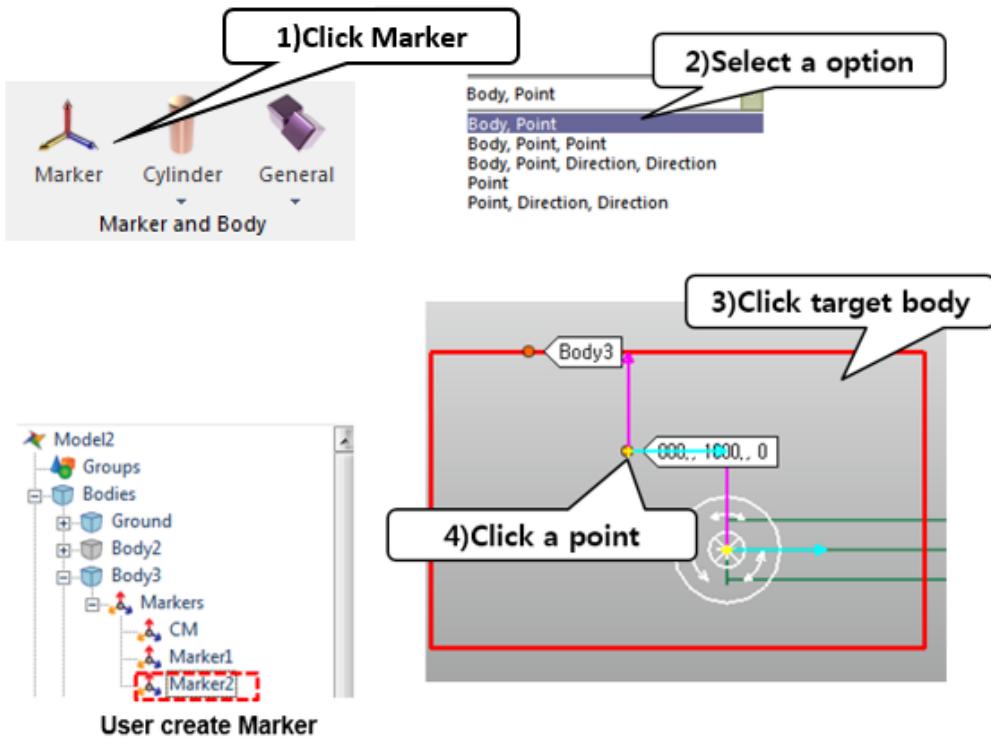


Figure 47 사용자 임의 Marker 생성

4. Geometry

Geometry는 Body의 형상을 결정하는 요소이며 Body에 종속적이다. 따라서 Body의 위치 또는 자세를 변경하게 되면 Geometry도 함께 이동하거나 회전한다. 또한 Geometry는 Body의 질량 및 관성모멘트를 결정하는 요소이기도 하다. 즉, Geometry의 부피와 밀도를 이용하여 Body의 질량정보를 입력하는 참조대상이다. RecurDyn에서 제공하는 Geometry의 형상은 Ball, Box, Cylinder와 같은 단순한 형상이며, 이러한 단순한 형상을 조합(unite, subtract, fillet, shell)하여 다양한 형태의 Geometry를 생성할 수 있다.

1) Geometry의 기준 좌표

Geometry의 기준 좌표 역시 Body 좌표계이다. 따라서 Body좌표를 정확히 알고 이에 맞도록 Geometry와 좌표를 결정하여야 사용자가 원하는 위치에 Geometry를 생성할 수 있다. Body 좌표계와 Geometry의 관계를 아래의 그림에 나타내었다.

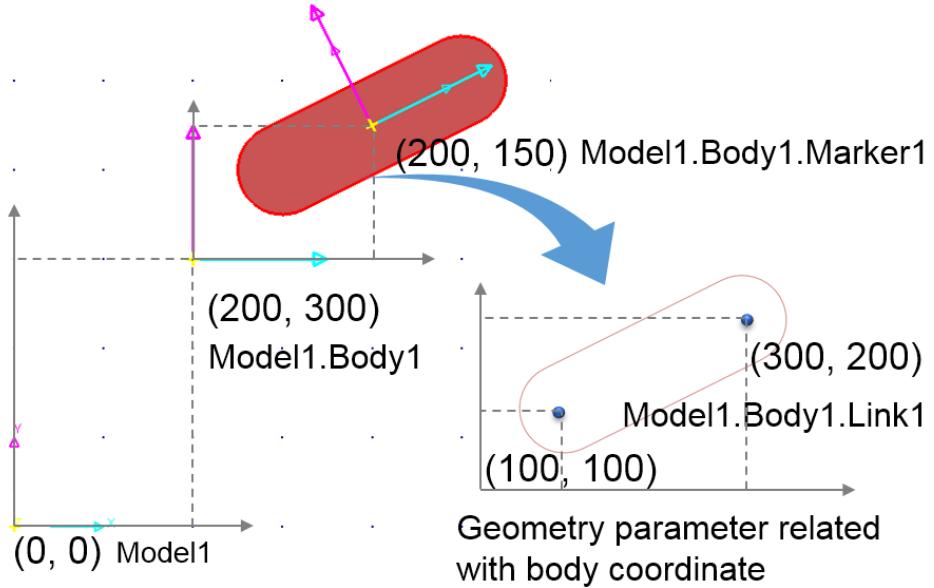


Figure 48 Geometry의 좌표 기준

그림은 Link Geometry를 생성하였을 때 Body 좌표계에 따라 입력 파라미터를 어떻게 넣어야 하는지 나타내고 있다. Link Geometry는 서로 떨어져 있는 두 점 사이를 반원과 사각형으로 채우는 형상으로서 두 점은 Body 좌표계를 기준으로 입력된다.

이러한 좌표 참조는 외부로부터 입력하는 CAD Geometry에 대해서도 동일한 기준으로 작동한다.

2) Geometry 종류 및 생성방법

(1) Sphere

Ellipsoid Geometry이며 3축의 반경으로 형상이 결정되며 3축의 반경이 동일하면 구의 형상이다.

UI에서 생성시 Working Window에서 원하는 위치를 선택한 후 반경까지의 벡터를 선택하면 생성된다. r 은 구의 반경을 나타낸다.

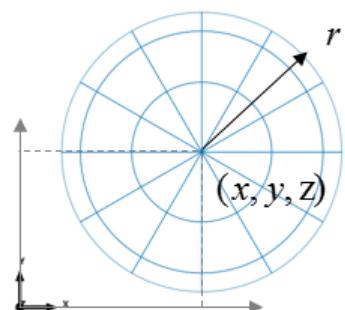


Figure 49 Sphere Geometry

(2) Cylinder

양쪽 단면이 동일한 반경을 가지는 원이며, 원의 반경과 길이로 형상이 결정된다.

UI에서 생성시 Working Window에서 원하는 두 위치를 선택하면 생성된다. r 은 단면 원의 반경을 나타낸다.

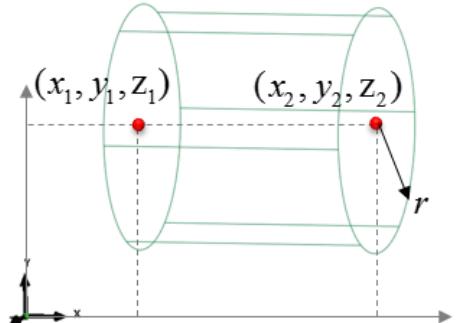


Figure 50 Cylinder Geometry

(3) Box

직육면체 형상이며 직육면체의 3축 방향 길이로 형상이 결정된다. UI에서 생성시 Working Window에서 양쪽 모서리의 위치를 입력하면 생성된다. 주의할 점은 z방향의 길이인 depth는 Box형상의 중심이 아닌 +z방향으로 확장된 형태로 그려진다.

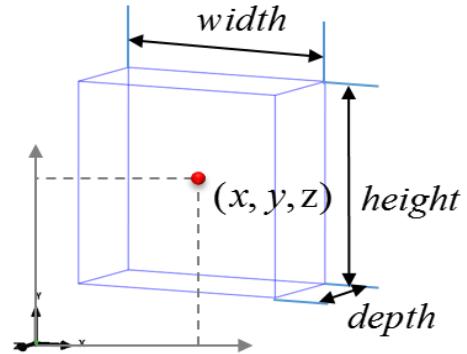


Figure 51 Box Geometry

(4) Torus

도너츠 형상의 Geometry이며 원의 중심위치와 단면 원 형상의 중심까지 거리(r_1), 단면 원의 반경(r_2), 단면의 회전각도로 형상이 결정된다.

UI에서 생성시 Working Window에서 중심위치와 단면 원까지의 거리를 입력하면 생성된다.

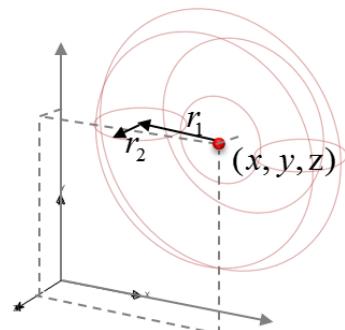


Figure 52 Torus Geometry

(5) Prism

정다각형 형태의 기둥모양의 Geometry로서 정다각형 단면 형상과 길이로 형상이 결정된다.

UI에서 생성시 Working Window에서 한쪽 단면의 중심위치와 반대쪽 단면의 중심위치를 입력하면 생성된다. r 은 양 끝점에서의 원의 반경을 나타내고 다각형 모서리 개수를 입력하여 단면 형상을 수정할 수 있다.

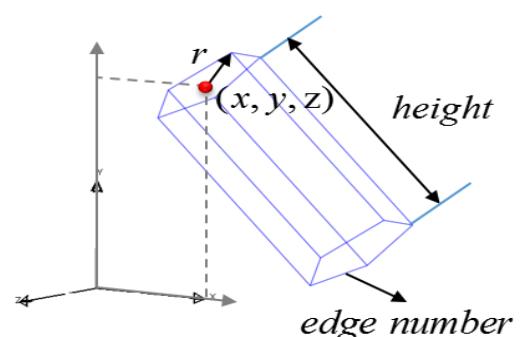


Figure 53 Prism Geometry

(6) Cone

양쪽 단면의 반경이 다른 실린더 형상으로서 단면의 반경과 높이로 형상이 결정된다.

UI에서 생성시 Working Window에서 한쪽 단면의 중심위치와 반대쪽 단면의 중심위치를 입력하면 생성된다. 또한 r_1 과 r_2 는 각각 양끝점에서의 원의 반경을 나타낸다.

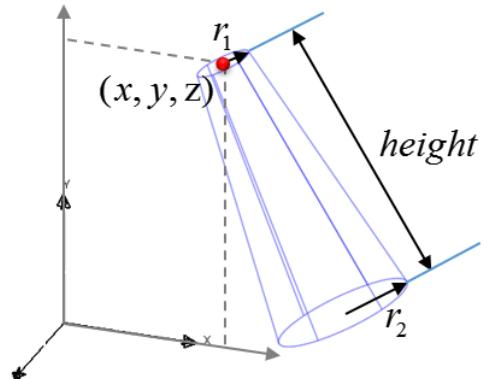


Figure 54 Cone Geometry

(7) Link

반경이 다른 링크형상으로서 반경, 반경 중심 사이의 거리 그리고 링크의 두께로 형상이 결정된다.

UI에서 생성시 Working Window에서 한쪽 원의 중심위치와 반대쪽 원의 중심위치를 입력하면 생성된다.

r_1 과 r_2 는 각각 양끝점에서의 호의 반경을 나타낸다.

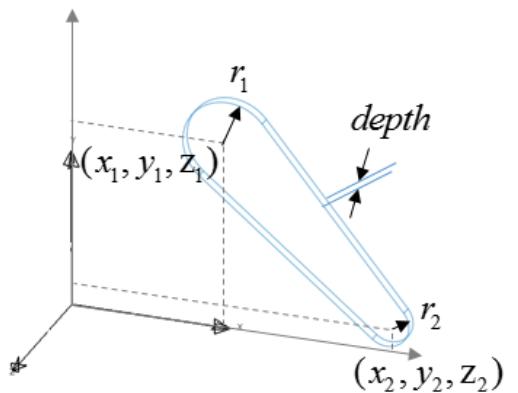


Figure 55 Link Geometry

5. 중력장에서 물체의 운동

중력장에서 물체는 중력의 영향으로 중력가속도만큼의 힘을 받게 된다. 이 때 물체가 공중으로 쏘아 올려지면 초기 속도 \dot{y}_0 을 가지고 수직방향으로 올라가다가 중력가속도만큼의 감속이 이루어진 후 최종적으로 정지하고 이 후 지속적으로 중력의 영향을 받아 $-y$ 방향으로 가속된다. 이러한 과정을 아래의 그림에 나타내고 있다.

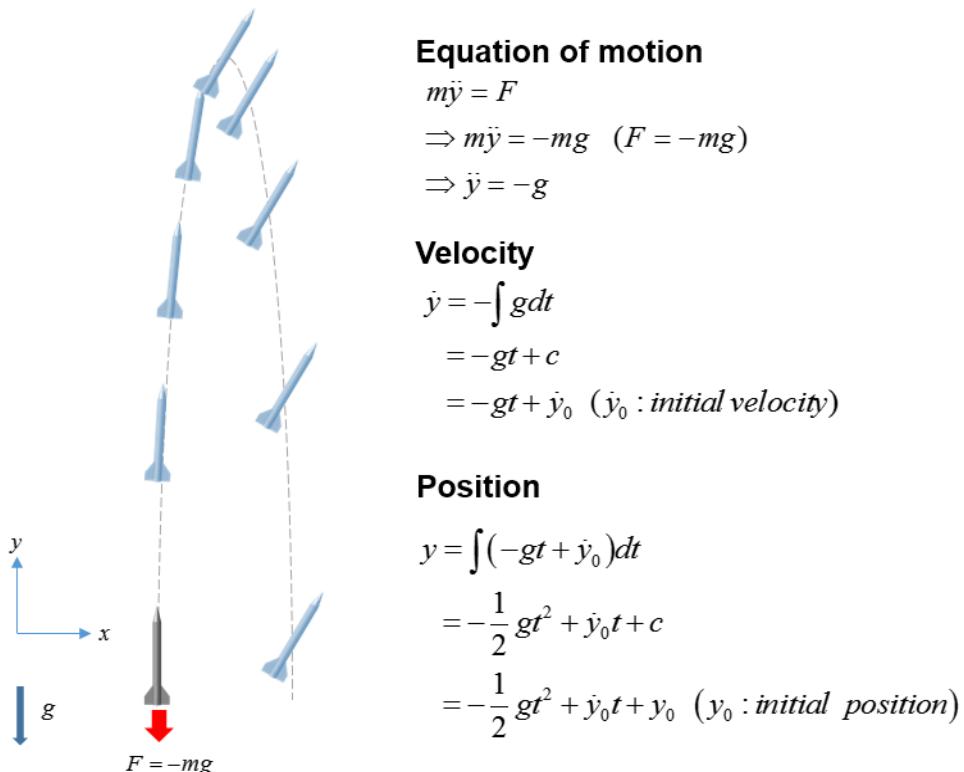


Figure 56 중력장에서 자유물체의 운동

중력장에서 하늘로 쏘아 올려진 물체의 위치, 속도 그리고 가속도를 그래프로 그려 보면 아래와 같이 위치는 시간에 대해 포물선을 그리며 높이 올라갔다 내려오며 속도는 초기속도부터 선형적으로 감소하고 가속도는 -9.8m/s^2 의 값으로 유지되는 것을 알 수 있다.

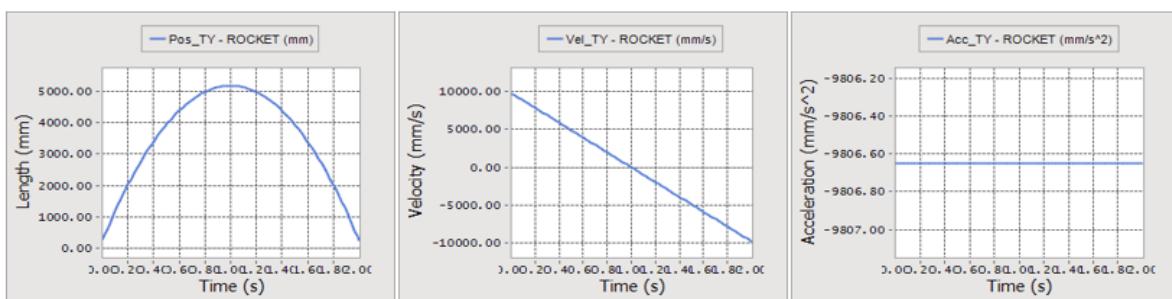


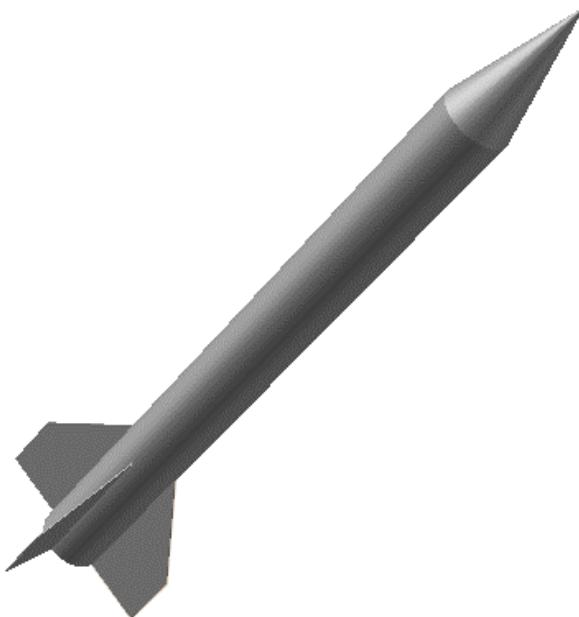
Figure 57 중력장에서 자유물체의 위치, 속도, 가속도

Workshop 4 Rocket Launch

내용: RecurDyn Geometry를 이용하여 로켓을 모델링하고 초기 속도를 이용하여 발사 시켜 중력장에서 로켓의 궤적과 속도를 그래프로 그리고 작동상태를 분석한다.

본 워크샵을 통해 아래의 관련기능을 익힐 수 있다

- Body and Geometry 생성 방법
- Body merging 및 Geometry 수정 및 편집 방법
- Body의 질량 및 관성모멘트 설정 방법
- Body의 초기속도 입력 방법



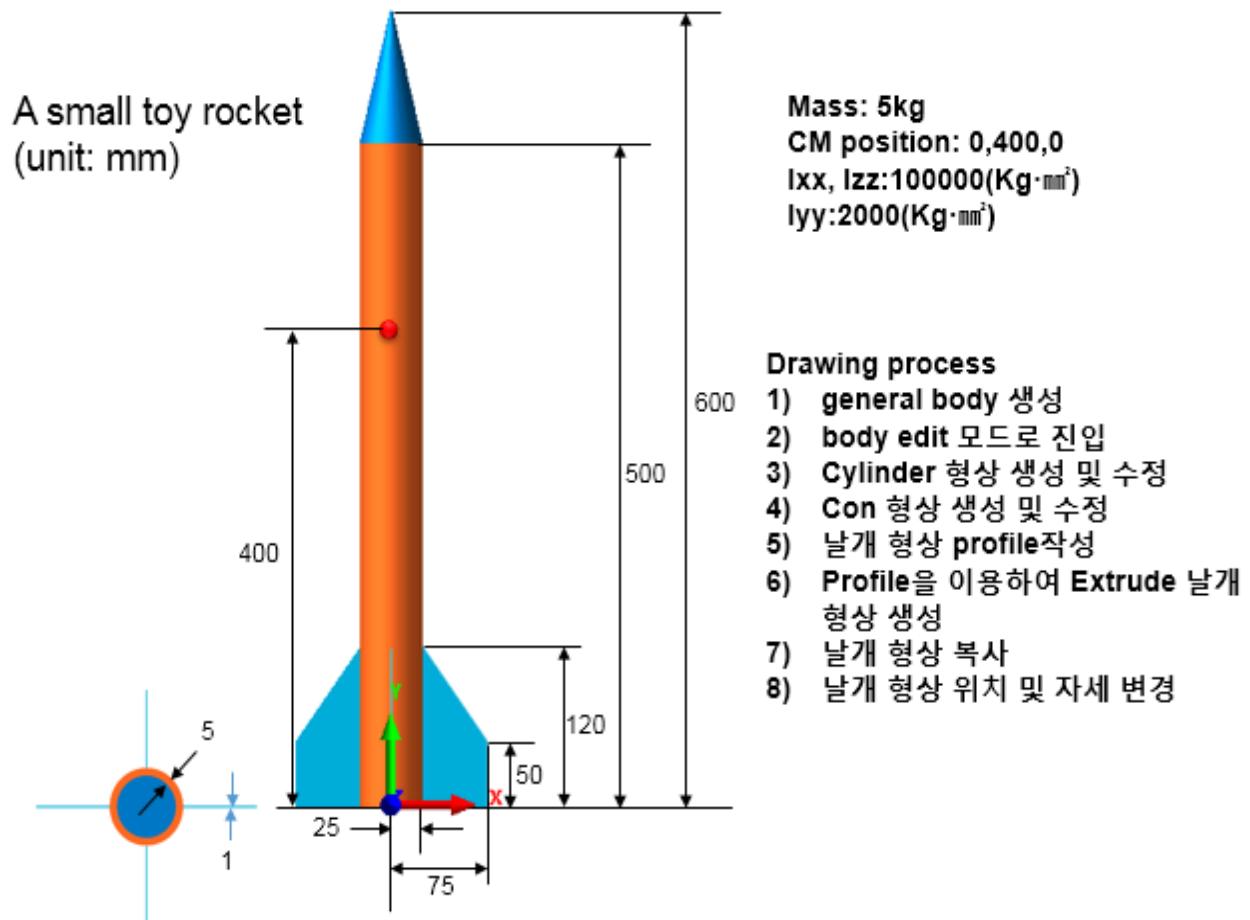
수행시간	40분
난이도 Level	1

Workshop 수행을 위해 필요한 사항

- RecurDyn Professional

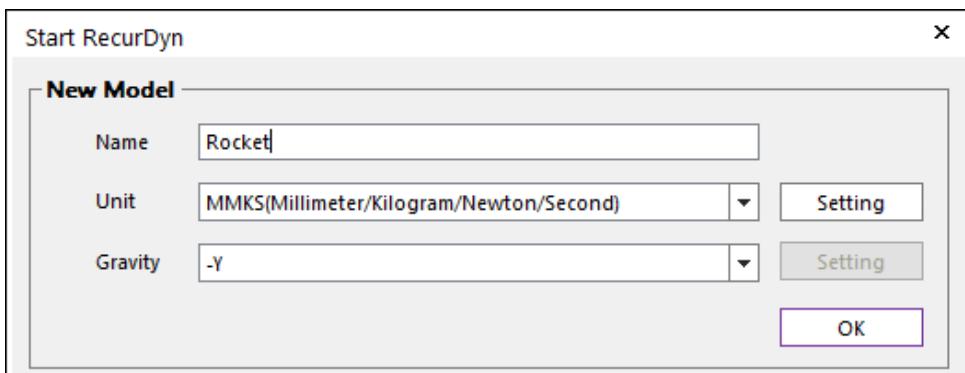
STEP 1 로켓 몸통 모델링

RecurDyn Geometry를 이용하여 로켓의 형상을 모델링 한다. 로켓은 60cm 크기의 소형이며 날개와 선수를 포함한 실린더 형태의 모델로서 대략의 형태를 표현한 모델이다. 본 Workshop을 통해 RecurDyn Geometry를 자유롭게 생성, 수정하는 방법을 익힐 수 있다.



STEP 2 몸통 및 탄두 모델링

1. RecurDyn 실행 및 New model 생성



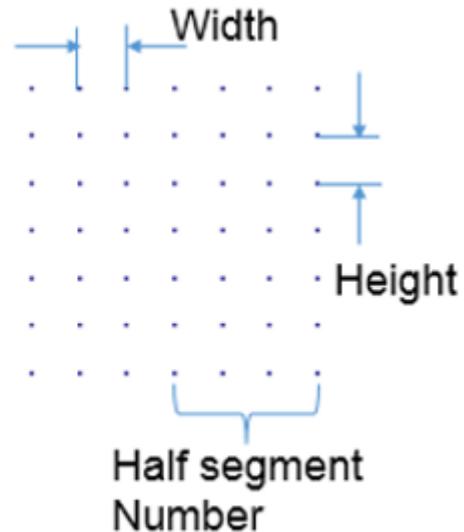
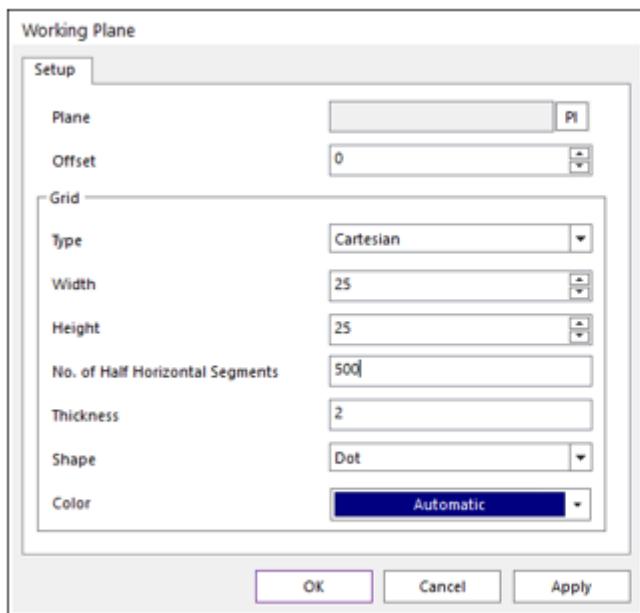
2. Professional Tab의 Body메뉴에서 General  을 Click하여 Body Edit Mode로 진입

* Body Edit Mode에 대해서는 Chapter 2.6에서 설명하고 있으며, 이 모드에서 하나의 Rigid body에 대한 Geometry를 편집함.

3. View Control 메뉴에서 Grid On/Off버튼  과 Snap to Grid  버튼을 클릭하여 두 기능 모두 On하고, Working Plane setup  버튼을 눌러 Grid 설정 창이 나타나게 함

4. Working Plane 설정 창에서 Width와 Height에 25를 입력하고 Ok

* Width와 Height는 Grid에서 횡 방향과 종 방향 점과 점 사이의 거리를 의미함



- Geometry Tab에서 Solid and Marker 메뉴의 Cylinder를 선택 후 Working window에서 (0,0,0)위치와 (0,500,0)을 클릭→ 두 지점을 연결하는 실린더 Geometry가 생성됨
- 생성된 Cylinder Geometry를 마우스로 선택 후 ‘p’ 버튼을 눌러 Property 수정 창을 연다
- First Point와 Second Point의 값이 각각(0,0,0) 과 (0,500,0)이 입력되어 있음을 확인하고 Radius값에 25를 입력하고 Ok
- Geometry Tab에서 Solid and Marker 메뉴의 Cone을 선택하고 Working Window에서 (0,600,0)위치와 (0,500,0)을 클릭→ 두 지점을 연결하는 Cone Geometry가 생성됨
- 생성된 Cone Geometry를 마우스로 선택 후 ‘p’ 버튼을 눌러 Property 수정 창을 열고 First Radius에 1을 입력하고 Second Radius에 25를 입력 후 Ok.
※ Radius는 각 점에서의 반경이며 Height는 First Point로부터의 Second point까지의 거리임



STEP 3 단일 날개 모델링

날개의 형상은 Line을 이용하여 Profile을 생성하고, 생성된 Profile로부터 다시 Solid 또는 Shell형상을 생성하는 기능을 이용함. 이 때 Extrude나 Sweep 기능을 이용한 Geometry는 Geometry 탭에서 생성가능하다.

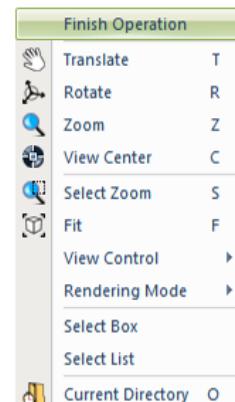
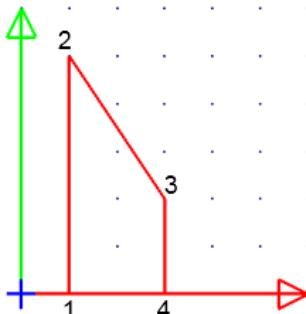
- Geometry 메뉴에서 Curve의 Outline



을 선택

- Working Window에서 다음의 위치를 순서대로 클릭하여 그림과 같은 모양의 Profile을 생성(화면에 보이는 좌표 값을 참고)
※ 최종Point를 선택한 후 마우스 오른쪽 버튼을 누르면 메뉴가 나타나며 Finish Operation 버튼을 선택하면 Profile이 생성됨

Point	입력 위치
1	25.0, 0.0
2	75.0, 0.0
3	75.0, 50.0
4	25.0, 125.0
5	25.0, 0.0



- Database window에서 생성된 Line1을 선택 후 ‘P’ 버튼을 눌러 Property 창을 열고, 입력

된 좌표의 내용을 확인 후, 25.0으로 입력된 값을 모두 20으로 수정 후 Ok.
(다음페이지 참조)

No	Points	
1	20., 0	Pt
2	75., 0	Pt
3	75., 50.	Pt
4	20., 125.	Pt
5	20., 0	Pt

4. Surface 메뉴의 Fill



선택 후 생성된 Outline1을 클릭하여 Surface를 생성한다.

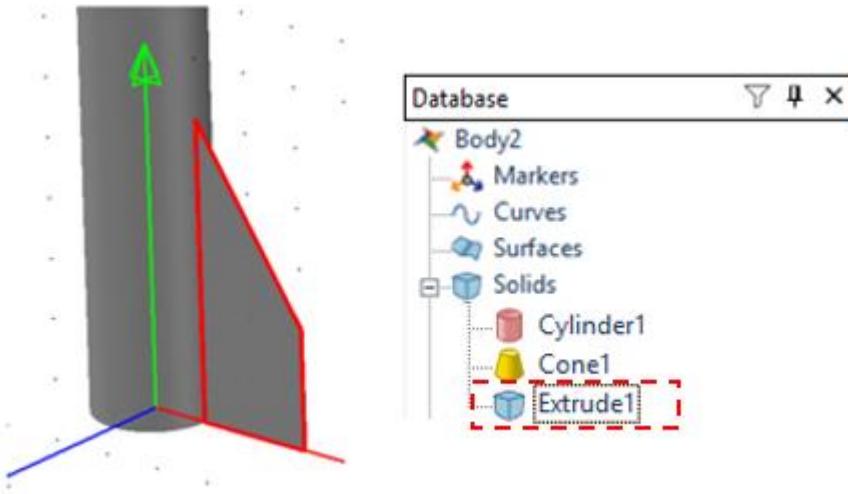
5. Solid 메뉴의 Extrude



선택 후 생성된 FilledSurface1을 클릭하고 두번더 클릭한
다.

6. 생성된 Extrude1을 선택 후 ‘p’ 버튼을 눌러 Property 창을 열고 Direction에 0,0,1을 입력
하고 Depth 값에 1입력.

Origin & Orientation Tab에서 Origin값에 (0,0,-0.5) 입력 및 Ok.



STEP 4 단일날개 형상을 복사하여 여러 개의 날개를 생성한 후 원하는 위치로 수정.

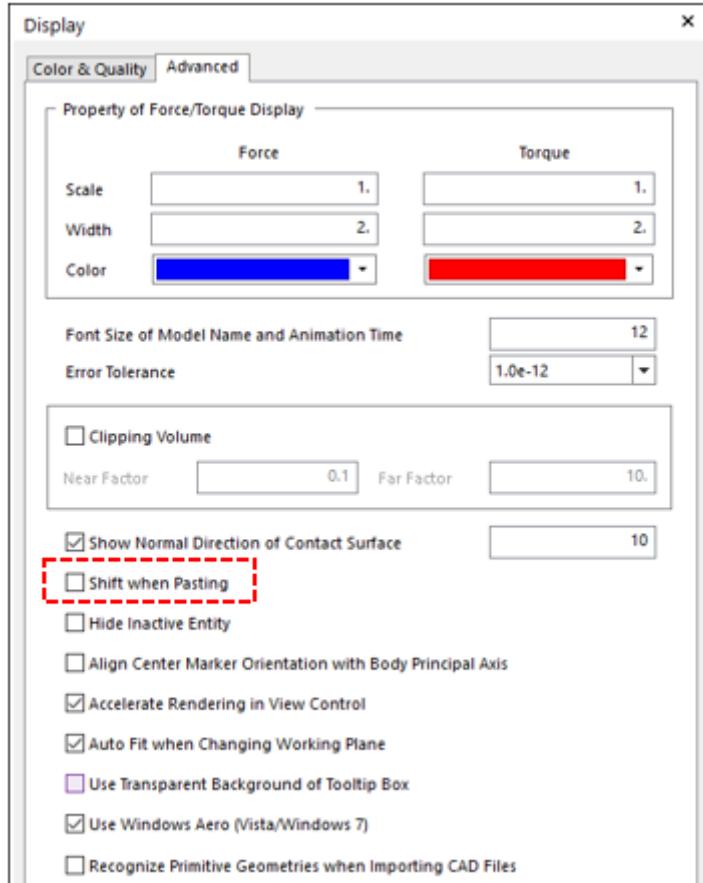
RecurDyn Entity는 Ctrl + ‘c’와 Ctrl + ‘v’ 버튼을 이용하여 쉽게 복사할 수 있다. 주
의할 점은 Default Setting상태에서 복사하면 대상 Geometry나 Marker의 Origin 값이
x, y, z 방향으로 각각 100씩 offset되어 만들어진다. 따라서 복사하기 전에 Shift when
pasting 옵션을 끄는 것이 좋다.

1. Home Tab의 Display



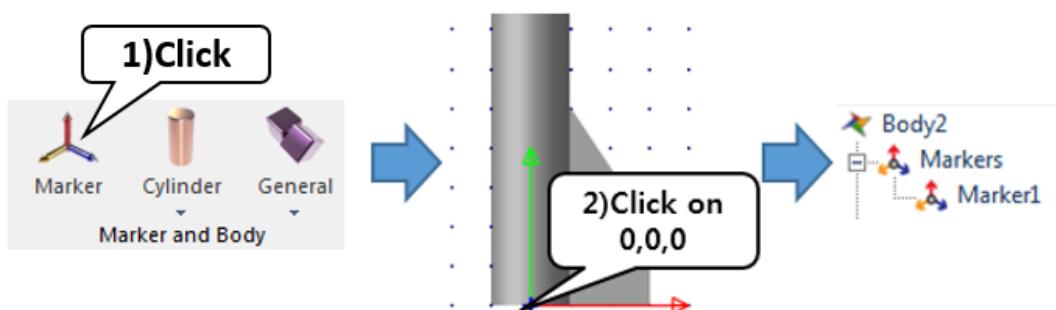
메뉴를 선택.

2. Display 설정 창이 나타나면 Advanced Tab에서 Shift when pasting의 Check 버튼을 눌러 기능을 끄고 Ok.

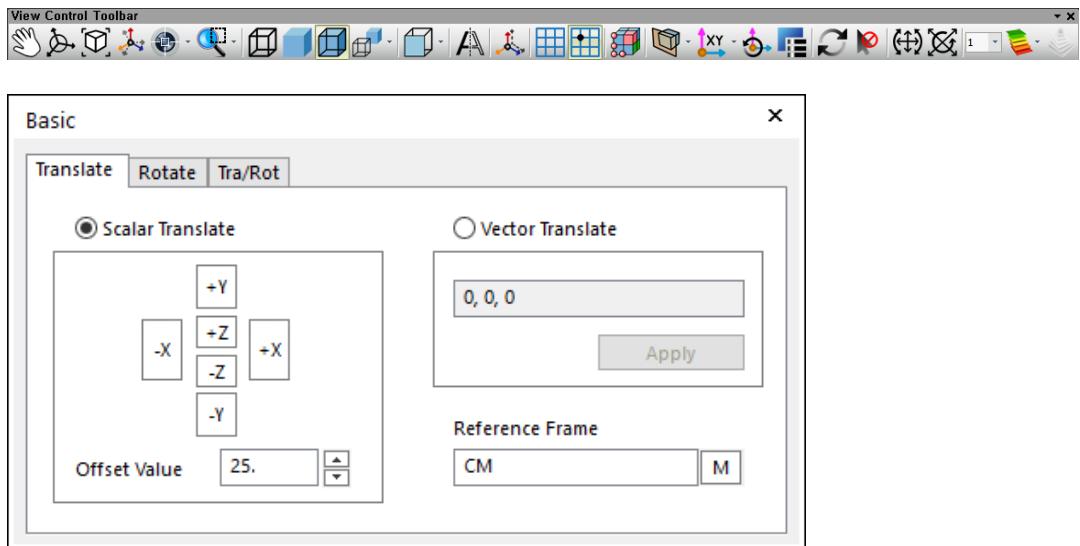


3. Working Window에서 생성된 날개 형상의 Extrude Solid를 선택 후 Ctrl + ‘c’ 버튼을 누른 다음, Ctrl + ‘v’ 버튼을 누른다. (Ctrl + ‘v’ 작업 총 3회 실시)
 → 완료 후 Database window에 C1_Extrude1, C2_Extrude1, C3_Extrude1과 같이 복사된 Geometry가 생성되는지 확인

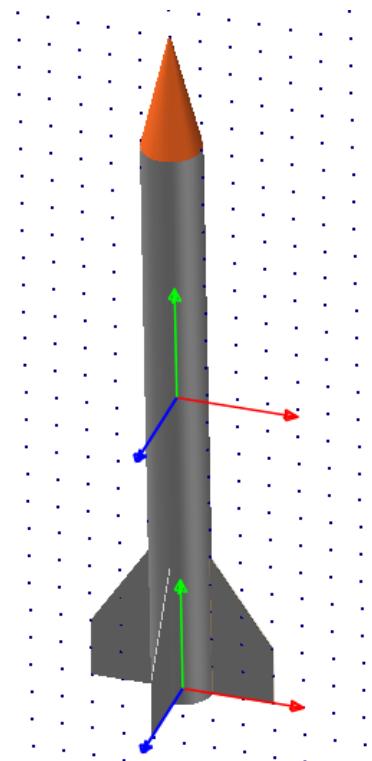
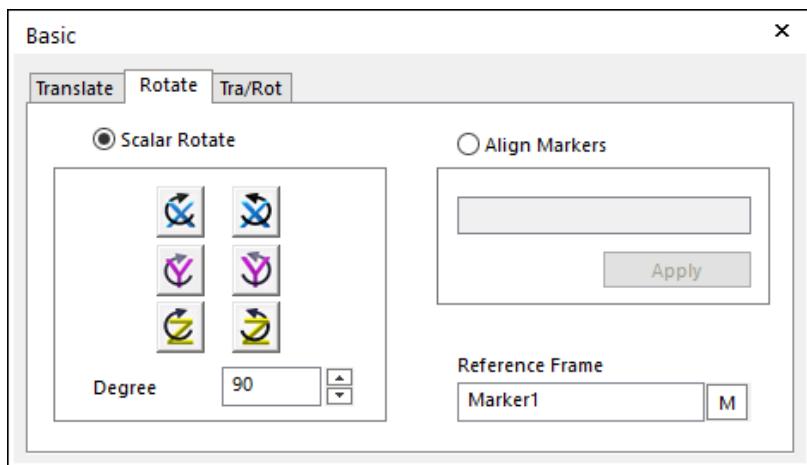
4. 생성된 Geometry를 날개가 있어야 할 각 위치로 옮기기 위해 Rotation 기능을 사용함, 이 때 기준이 되는 Marker를 정의하기 위해 임의의 Marker를 0,0,0 위치에 생성시킴.



5. View Control Toolbar에서 Object Control 버튼  선택.



6. Rotate Tab을 선택 후 Degree에 90 입력 후 Reference Frame에 Marker1 입력.



7. Working Window 또는 Database Window에서 C1_Extrude1 Geometry를 선택 후 y축 방향으로 회전버튼을 눌러 90도 회전시킴.

8. Working Window 또는 Database Window에서 C2_Extrude1 Geometry를 선택 후 y축 방향으로 회전버튼을 두 번 눌러 180도 회전시킴.

9. Working Window 또는 Database Window에서 C3_Extrude1 Geometry를 선택 후 y축 방향으로 회전버튼을 세 번 눌러 270도 회전시킴.

STEP 5 몸통을 실린더 형상으로 변경하고 날개를 몸통에 붙임

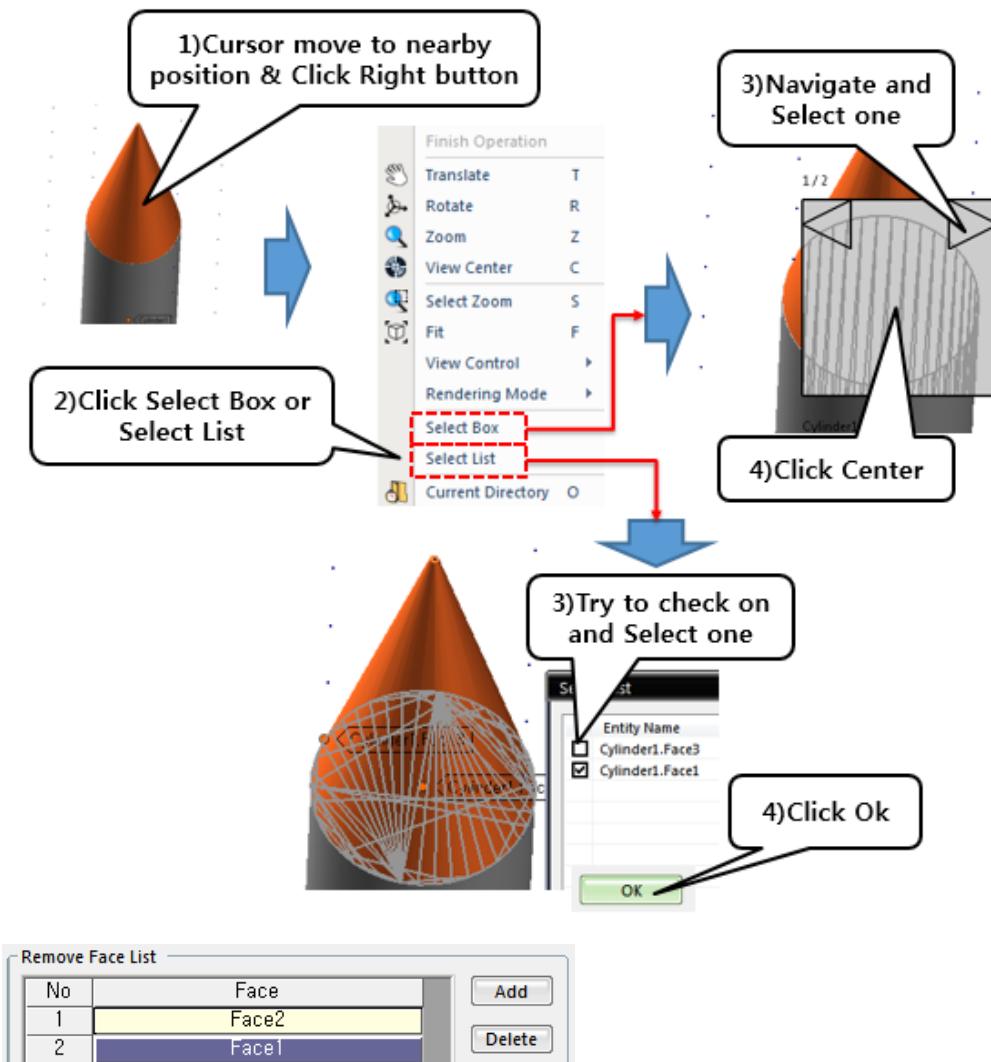
Shell 기능은 Solid의 형상에서 내부를 파내어 원하는 두께를 가지는 Solid 형상을 만들어내는 기능이다. 이 때 완전히 파내는 면을 지정하면 해당 면도 함께 제거된다. 즉, 6면체의 Solid에 대해 한 면을 선택하고 두께 t만큼을 지정하고 shell기능을 수행하면 한 쪽 면만 뚫어진 두께 t만큼을 가진 Bucket이 만들어진다.

1. Geometry Tab의 Local 메뉴에 있는  Shell기능을 선택

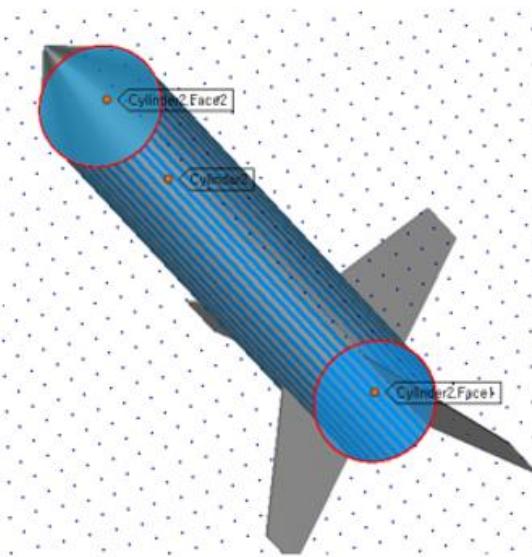
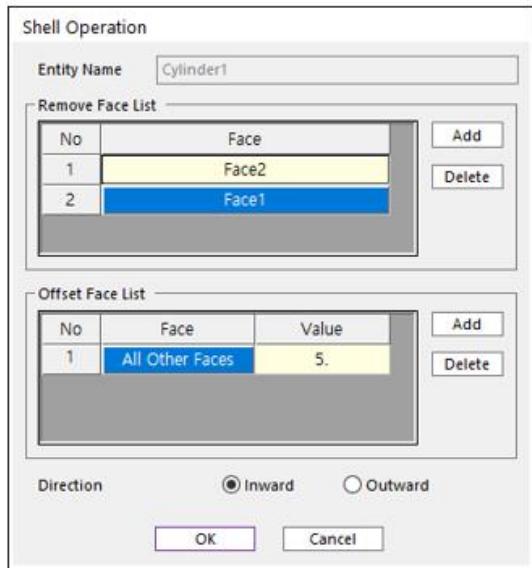
2. Shell기능을 적용할 Solid로 Cylinder1 Geometry를 선택

3. Shell Operation 창이 나타나면 Remove Face List의 Add 버튼을 눌러 Cylinder 형상의 아래와 위의 단면을 선택함

* 다른 Geometry에 가려져 선택이 용이하지 않을 경우 Select Box 또는 Select List 기능을 이용하여 선택



4. Offset Face List에 All Other Faces인 상태에서 Value는 5를 입력, Direction은 Inward선택 후 Ok



5. 마지막으로 모든 Geometry의 형상을 하나의 Solid로 만들기 위해 Boolean Operation을 수행 → Geometry Tab의 Boolean 메뉴의 Unite  선택

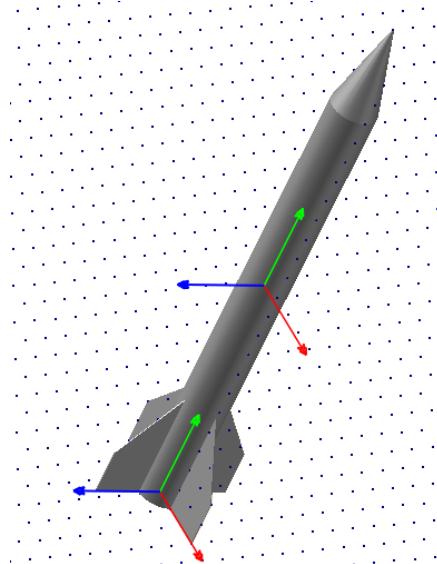
6. Shell 기능을 수행한 Geometry Shell1을 선택 후, Cone1 선택

→ Database Window에 Shell1과 Cone1이 없어지고 Unite1이 생성됨

7. Geometry Tab의 Boolean 메뉴의 Unite 선택 후 Unite1과 Extrude1을 순서대로 선택
→ Database Window에 Unite1과 Extrude1이 없어지고 Unite2가 생성됨

8. Geometry Tab의 Boolean 메뉴의 Unite 선택 후 Unite2와 C1_Extrude1을 순서대로 선택
→ Database Window에 Unite2과 C1_Extrude1이 없어지고 Unite3가 생성됨

9. 동일한 방법으로 C2_Extrude1, C3_Extrude1에 대해 Unite 작업을 수행



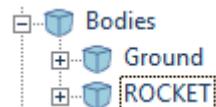
* Geometry에 대한 Unite작업은 외부의 CAD Data를 사용하여 작업할 경우 거의 필요로 하지 않는다.
Unite 작업이 반드시 필요한 경우는 동일한 위치에 Geometry가 중복되어 있거나 서로 붙어 있는 Surface가 필요한 경우이다.
그림과 같이 Extrude, Sweep Boolean 편집 기능 등을 이용하면 다양한 형상을 간단하게 표현할 수 있다. 이러한 형상은 대상을 간략하게 표현하는 용도로 유용하다.



10. Exit 버튼을 눌러 Body Edit Mode를 빠져 나옴

11. Database Window에서 Body1을 선택한 후 마우스 오른쪽 버튼을 눌러 Rename 메뉴를 선택

12. Body name을 ROCKET으로 변경 후 ‘Enter’



STEP 6 Mass Property와 CM의 위치 및 Initial Velocity 입력

만들어진 로켓 모델을 지상으로부터 쏘아 올리기 위해 초기 속도를 입력하는 방법을 통해 모델을 완성한다. 모델의 초기조건으로는 위치와 속도가 있으며 위치는 현재 모델링 된 상태를 나타내며 초기속도는 사용자가 임의로 입력하지 않는 한 0의 값이 입력된다

1. Working Window에서 ‘RORCKT’ Body를 선택한 후 ‘p’버튼을 누름

→ Property Edit 창을 열림

2. Material Input Type을 Library에서 User Input으로 변경 후 ‘Apply’ 버튼을 누름

*Apply버튼을 누르지 않으면 CM의 위치를 변경할 수 없음

3. 질량 및 관성 입력 창에 아래의 내용을 입력

Mass	5		
Ixx	100000	Ixy	0
Iyy	2000	Iyz	0
Izz	100000	Izx	0

4. CM(Center Marker) 버튼을 누름 → CM Marker Property 창이 나타남

5. Origin에 (0,400,0)을 입력 후 Ok.

6. Initial Condition의 Initial Velocity 버튼을 누름 → Body Initial Velocity 창이 나타남

7. Translational Velocity 항목의 y check버튼을 On 하고 값으로 9800 입력 후 Close

* y방향으로 9800mm/s의 속도로 발사되며, 중력가속도 9.8m/s²에 의해 정확히 1초 후 로켓의 속도는 0이 됨

8. Ok버튼을 눌러 Properties of ROCKET 창을 빠져 나옴

STEP 7 시뮬레이션 수행 및 위치, 속도 및 가속도 PLOT

동역학 해석을 수행하고 Post-processor에서 로켓의 위치, 속도, 가속도를 그래프로 그려 본다.

1. Simulation 버튼  을 누름 → Dynamic/Kinematic Analysis 창이 열림
Dyn/Kin

2. End time에 2를 입력하고 step은 200을 입력 후 Simulate버튼을 누름

3. Plot_Result 버튼  을 눌러 Post-processor로 진입
Result

4. Window 버튼  의 하단에 있는 화살표 부분을 누르고  메뉴를 선택하여

Plot Window의 창이 4개로 분할되도록 설정

5. 좌측 상단의 창을 마우스로 눌러 선택, Plot database 창에서 Bodies/ROCKET/Pos_TY를 더블 클릭하여 그래프를 그림

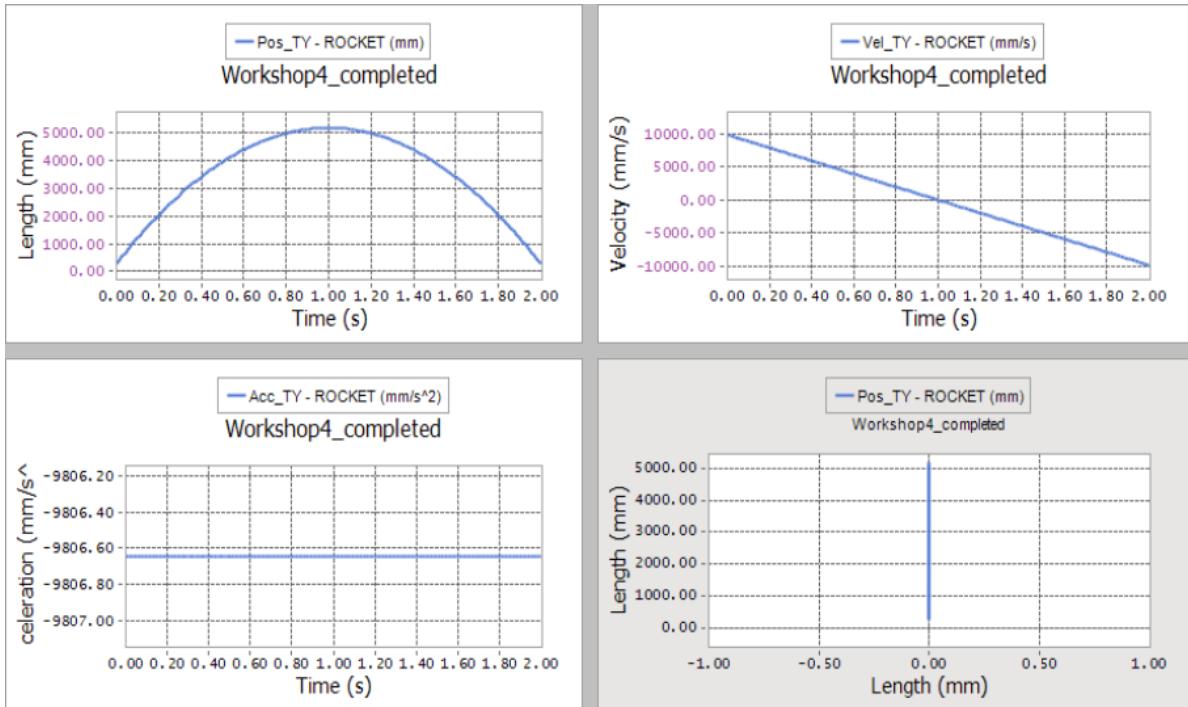
6. 우측 상단의 창을 마우스로 눌러 선택, Plot database 창에서 Bodies/ROCKET/Vel_TY를 더블 클릭하여 그래프를 그림

7. 좌측 하단의 창을 마우스로 눌러 선택, Plot database 창에서 Bodies/ROCKET/Acc_TY를 더블 클릭하여 그래프를 그림

STEP 8 마지막으로 Rocket의 궤적을 보기 위해 X축의 값에 시간이 아닌 X방향 변위를 선택하고 Y축에 Y방향 변위를 입력하여 그래프를 그려본다

1. 우측 하단의 창을 마우스로 눌러 선택하고 Plot Database 창의 하단에 있는 X Axis X Tab 을 선택 후 Bodies/ROCKET/Pos_TX를 클릭

2. Plot Database창의 하단에 있는 Y Axis Y Tab을 선택 후 Bodies/ROCKET/Pos_TY를 더블 클릭하여 그래프를 그림



※ 마지막으로 선택된 창은 배경색이 진하게 나타나는 것을 볼 수 있으며, Capture하게 되면 이 색이 그대로 남아 있다. 이 배경색을 원래대로 되돌리려면 각 Plot 창의 테두리부분을 Click하면 선택해제 된다.

Chapter 5. Object Control and Joint

Lecture:

Geometry나 Marker의 위치나 자세를 이동시키는 방법을 익히고, joint의 생성방법과 Body 및 joint의 초기 조건을 입력하는 방법을 익힌다.

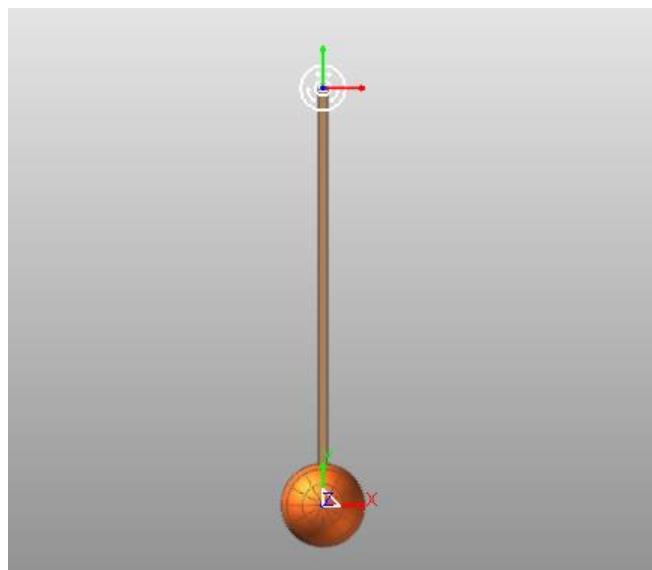
Workshop

Body와 Joint를 이용하여 단진자를 모델링하고 초기조건을 달리하여 단진자의 진동주기를 해석해본다. 수치해석적인 해석결과와 수학적 진동주기를 분석하여 해의 정확도를 분석한다.



소요 시간

강의명	시간(분)
Marker와 Geometry의 이동 및 Body, Joint의 초기조건의 입력방법	30 분
Pendulum modeling Workshop	30 분
총합	60 분



1. Marker 또는 Geometry의 이동 및 회전

다룰체시스템을 모델링 하는 과정에서 Geometry를 생성하거나 Marker를 생성한 후 이동 및 자세를 수정해야 하는 일은 빈번하게 발생한다. 이 때 Chapter 4에서 배운 내용과 같이 각 Entity의 Origin과 Orientation을 직접 입력하는 방법을 사용할 수 있지만 직관적으로 이동하거나 특정 축에 대해 회전하는 방법을 이용하여 원하는 위치나 자세를 구현하는 방법도 있다. 그러한 기능을 담당하는 Tool이 Basic Object Control과 Advanced Object Control이다. 본 절에서는 이 Tool의 사용 방법에 대해 익힌다

1) Basic Object Control

View Control toolbar에 있는 메뉴 중 Basic Object Control은 원하는 Geometry나 Marker를 특정 Marker나 Global Origin에 대해 원하는 수치만큼 이동시키는 기능을 수행한다.



Figure 58 Basic Object Control Tool

(1) Translate

Translate 기능은 원하는 Entity를 Reference frame에 대해 원하는 방향으로 Offset Value만큼 평행 이동시키는 기능이다.

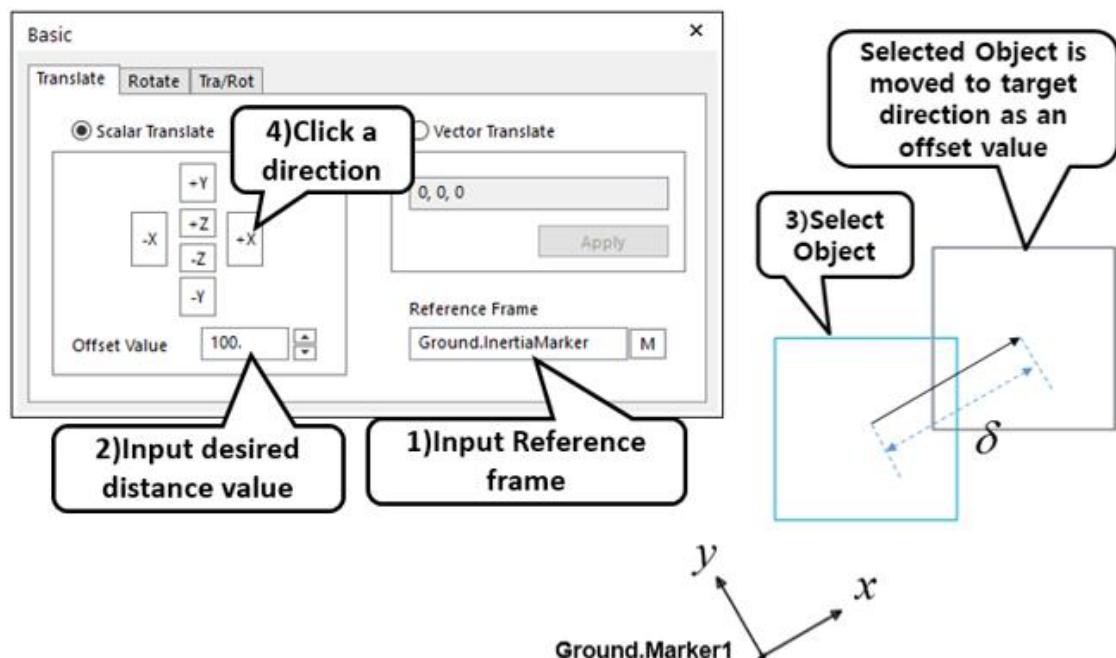


Figure 59 Translate using Basic Object Control

Vector Translate의 경우 x, y, z 각 방향에 대해 입력한 벡터만큼 Reference Frame의 축 방향으로 이동하는 기능이며 개념적으로 Scalar Translate와 동일하다. 이 때 Geometry 또는 Marker의 Orientation은 바뀌지 않는다.

(2) Rotate

Rotate 기능은 원하는 Entity를 Reference Frame을 기준으로 원하는 축의 회전방향에 대해 Degree 입력 값만큼 회전시킨다. 이 때 Entity는 Reference Frame의 위치에 따라 병진이동과 회전이 동시에 발생한다.

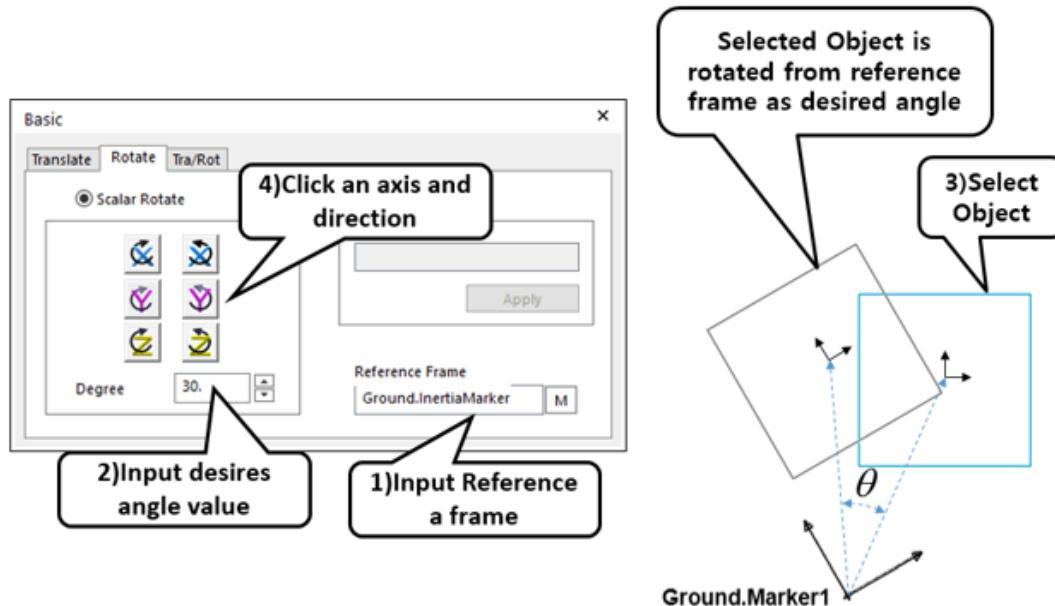


Figure 60 Rotate using Basic Object Control

Align Markers의 경우 선택된 Marker를 Reference Marker와 동일한 자세가 되도록 Orientation을 회전시키는 기능이다. Chapter 4에서 Body좌표계에 대해 이미 설명한 바가 있다. 서로 종속적인 Body가 다르고 각 Body좌표계가 서로 다른 자세로 모델링 된 경우에 두 Marker를 동일한 자세로 만들기 위해서는 이 기능을 사용해야 한다.

(3) Tra/Rot

이 기능은 선택된 Entity를 병진이동과 회전을 동시에 수행할 경우 사용된다. 그러나 대부분의 작업은 앞서 설명한 Translation과 Rotation의 개별적 기능을 통해 수행할 수 있다.

2) Advanced Object Control

이 기능은 Entity를 이동시키거나 회전시키는 방법을 보다 엄밀하고 유용하게 사용하기 위한 도구이다. Advanced에서는 Basic 기능과 같이 특정 값만큼 이동시키는 것이 아니라 특정 위치까지 이동시키거나 특정 면과 나란하도록 회전시키는 것과 같이 모델링되어 있는 Geometry를 참조하여 이동 및 회전을 수행한다.



Figure 61 Advanced Object Control Tool

(1) Translate

Two Point 기능은 원하는 Entity의 선택한 위치를 Target 위치까지 이동시키도록 Entity의 Origin을 변경시키는 기능이다. 이 때 입력 값은 기준점(First Point)과 목표점 (Second Point)이다. Translate 버튼을 누르면 선택된 Entity는 기준점과 목표점 사이의 거리벡터만큼 병진이동이 이루어진다.

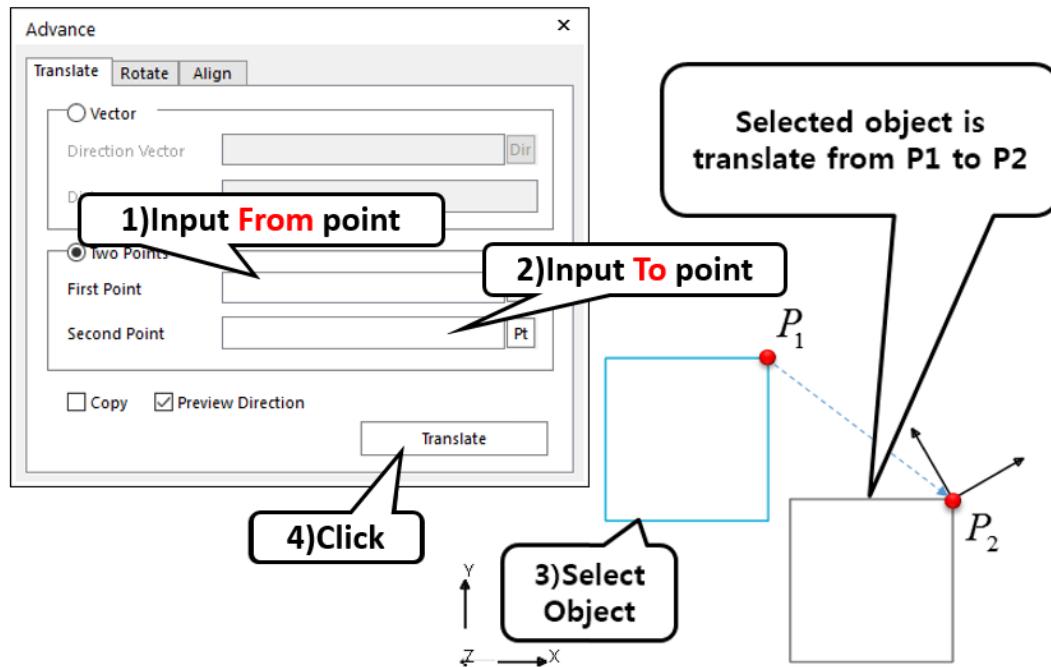


Figure 62 Translate using Advanced Object Control

Vector 기능은 Basic Translate 기능과 동일한 기능으로서 입력한 벡터방향으로 Distance 만큼의 거리를 병진 이동한다.

(2) Rotate

Scalar 기능은 Geometry상의 원하는 축 벡터를 선택 후 오른손 법칙방향으로 Degree 입력값 만큼 회전시킨다. 이때 축 벡터의 선택은 Rotate Axis버튼을 이용하여 정한 축이며, 해당 축의 오른손 법칙에 따라 입력 Degree만큼 회전시킨다.

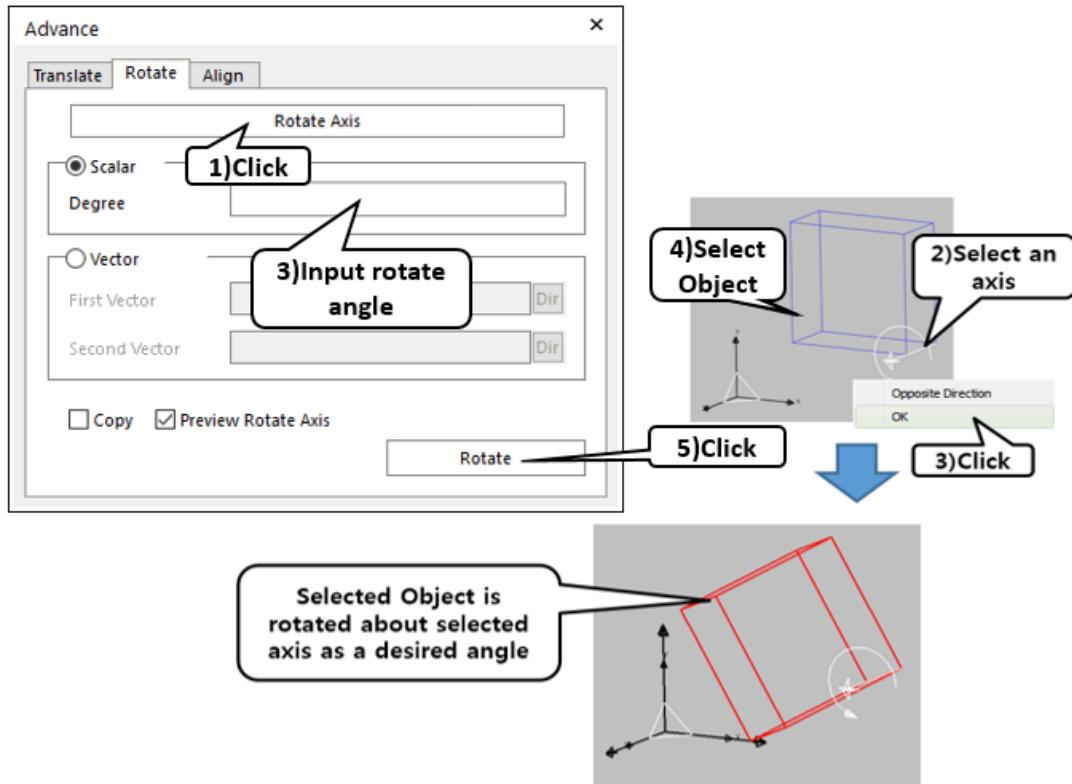


Figure 63 Scalar rotate using Advanced Object Control

Vector 기능은 Rotate Axis가 결정된 상태에서 두 벡터가 이루는 각도만큼 오른손법칙에 따라 Entity를 회전시키는 방법이다.

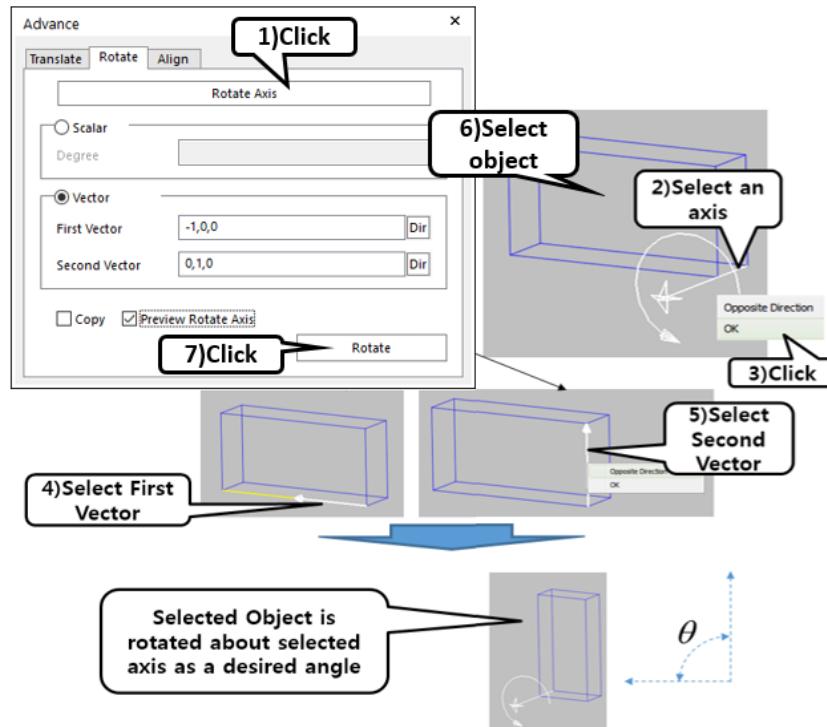


Figure 64 Vector rotate using Advanced Object Control

(3) Align

Orientation 기능은 선택한 Entity의 Orientation을 Reference Object의 Orientation과 동일하도록 설정하는 기능이다. 이 기능은 Orientation의 값을 복사하는 것과 같으므로 Body 좌표계를 고려하여 사용하는 것이 바람직하다.

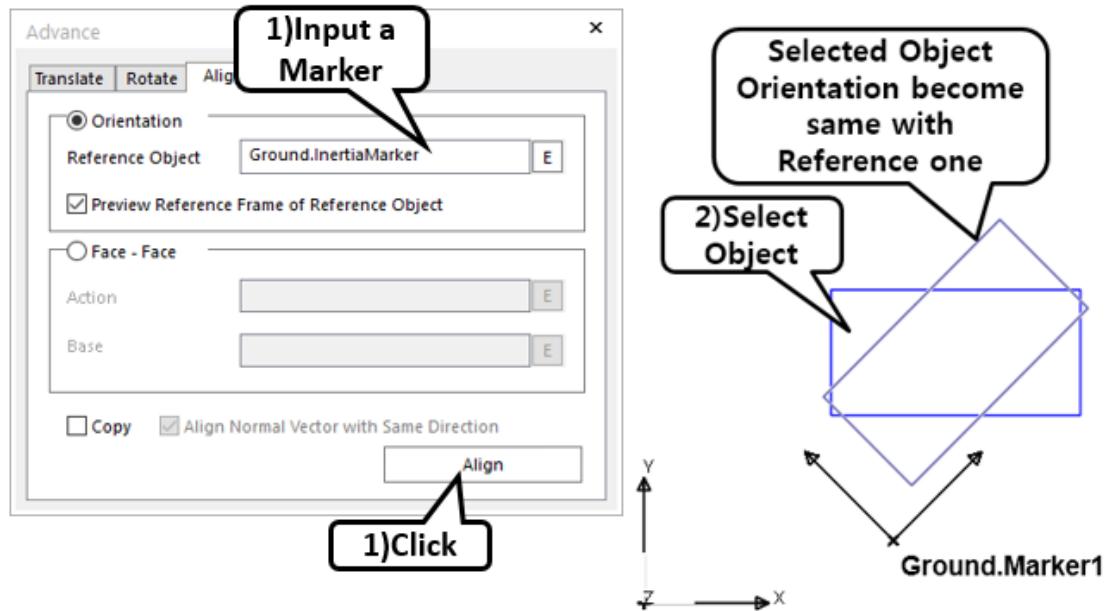


Figure 65 Orientation Align using Advanced Object Control

Face to Face 기능은 Action Face의 Normal Vector와 Base Face의 Normal Vector를 나란히 두거나 반대가 되게 선택된 Entity를 이동 및 회전시키는 기능이다.

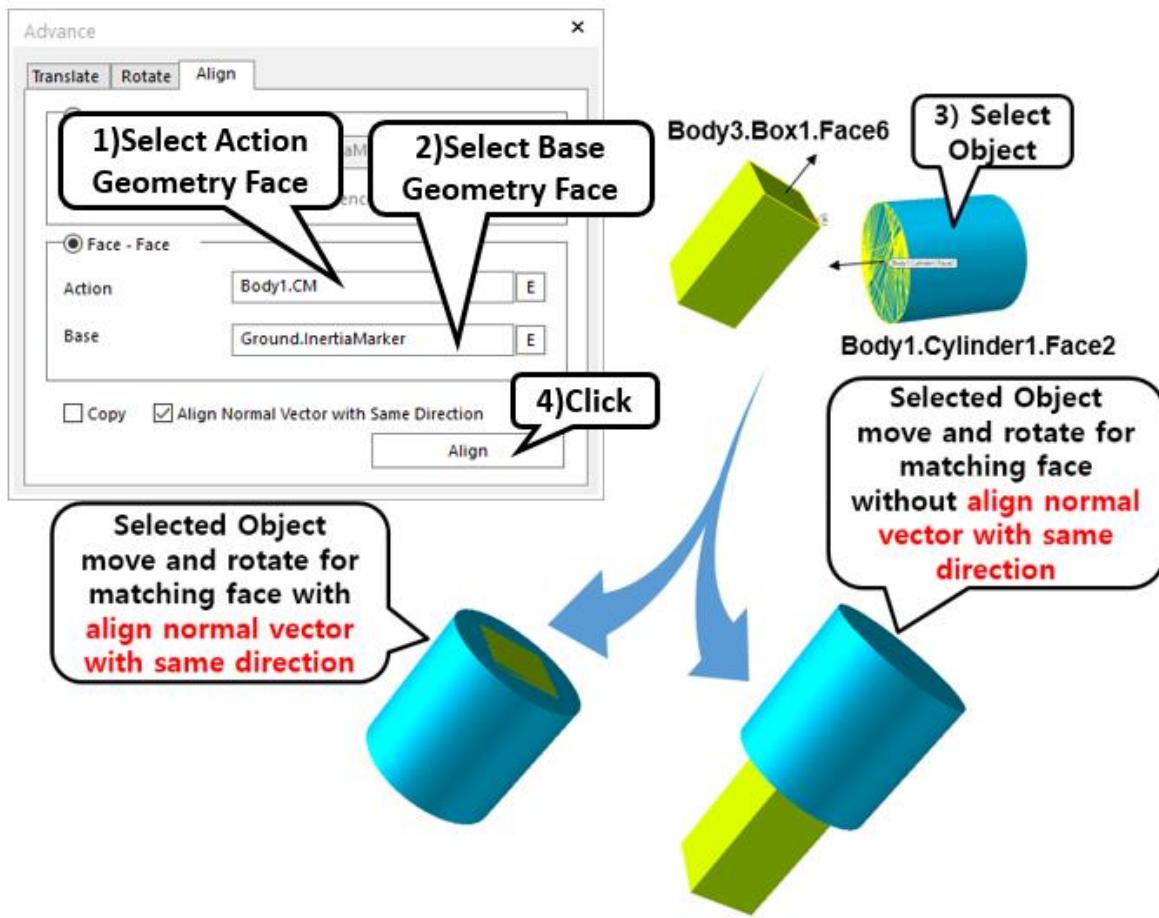


Figure 66 Face to Face Align using Advanced Object Control

2. Joint

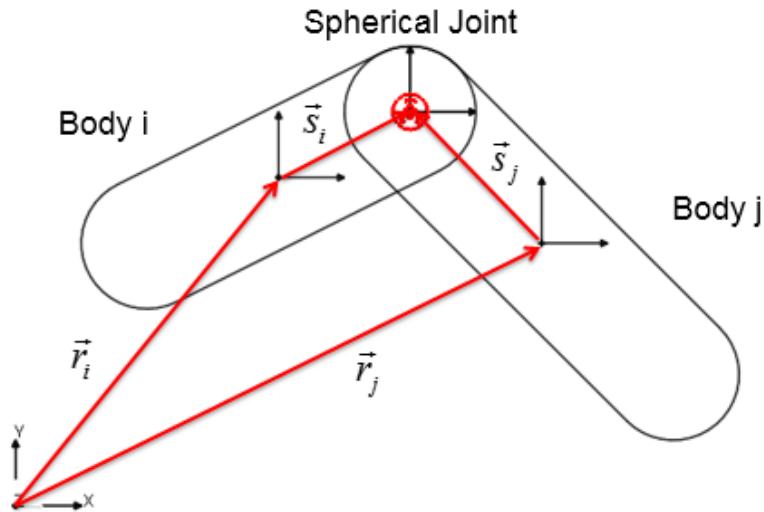
Joint는 다물체 동역학 해석기법의 가장 큰 특징 중의 하나이다. 일반적인 FE 솔루션은 Joint와 같은 자유로운 자유도의 구속을 입력할 수 없지만 다물체 동역학에서는 복잡한 구속방정식을 구현하여 시스템의 자유도를 입력할 수 있다.

Joint는 강체가 가지는 자유도를 제거하여 원하는 자유도를 구현하는 기능뿐만 아니라 Joint의 구속에 필요한 하중을 계산해 주는 역할을 한다.

1) Joint와 구속식

Joint의 구속식은 시스템의 각 부품이 연결되어 있는 상태를 수학적으로 구현한 것이다. 이 수학적인 연결구조는 해석과정에서 분리 이탈되지 않으며 연결을 유지시키기 위해 필요한 Joint 반력이 계산된다.

Joint 구속식의 대표적인 형태는 위치 조건식이다. 이 조건식은 두 물체에 고정된 각각의 점이 공간상 한 점에서 만난다는 조건으로서 Spherical Joint의 구성에 사용된다. 수식은 다음과 같다.



$$\Phi_{s(3 \times 1)} = \vec{r}_i + \vec{s}_i - \vec{r}_j - \vec{s}_j = \begin{bmatrix} r_{ix} \\ r_{iy} \\ r_{iz} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} s_{ix} \\ s_{iy} \\ s_{iz} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} r_{jx} \\ r_{jy} \\ r_{jz} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} s_{jx} \\ s_{jy} \\ s_{jz} \end{bmatrix} = 0$$

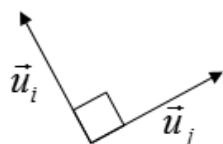
Figure 67 두 점을 연결하는 위치 조건식과 Spherical Joint

여기서 i 와 j 는 Body를 의미한다. Spherical Joint의 경우 Global 원점에서 각 Body까지 거리벡터 \vec{r} 과 각 Body에서 Joint까지의 거리벡터 \vec{s} 의 합이 항상 0이라는 조건식으로 만들어진다. 다물체동역학의 운동방정식dms 이러한 구속식이 항상 만족하도록 계산된다.

다른 여러 Joint를 생성함에 있어 앞서 설명한 위치 조건과 함께 각도 조건이 사용된다. 가장 대표적인 각도 조건은 두 벡터가 서로 수직이라는 조건이며, 수학적으로는 두 벡터의 곱이 0인 경우에 해당한다. 아래의 그림에 쉽게 설명해 두었다.

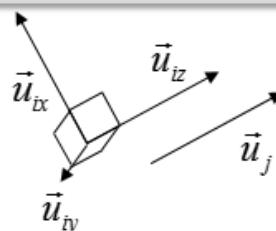
두 벡터가 서로 수직일 조건식

코사인 법칙: $\cos \theta = \frac{\vec{a} \cdot \vec{b}}{\|\vec{a}\| \|\vec{b}\|} = \vec{a} \cdot \vec{b}$ (if \vec{a}, \vec{b} is unit vector)



$$\Phi_n = \vec{u}_i \cdot \vec{u}_j = u_i^T u_j = u_{ix} u_{jx} + u_{iy} u_{jy} + u_{iz} u_{jz} = 0$$

두 벡터가 서로 평행할 조건식



$$\Phi_p = \begin{cases} \Phi_{n1} = u_i^T u_j = u_{ix} u_{jx} + u_{iy} u_{jy} + u_{iz} u_{jz} = 0 \\ \Phi_{n2} = u_j^T u_i = u_{jx} u_{ix} + u_{jy} u_{iy} + u_{jz} u_{iz} = 0 \end{cases}$$

Figure 68 두 벡터의 각도 조건식

각도에 대한 조건식을 잘 조합하면 다양한 형태의 Joint를 구성할 수 있다. 예를 들어 Universal Joint의 경우 위치 조건식과 함께 두 축이 수직이라는 조건을 같이 사용하면 수학적 구속식이 완성된다. 다른 여러 Joint의 경우도 이러한 수학적 조건식의 조합을 통해 구성된다.

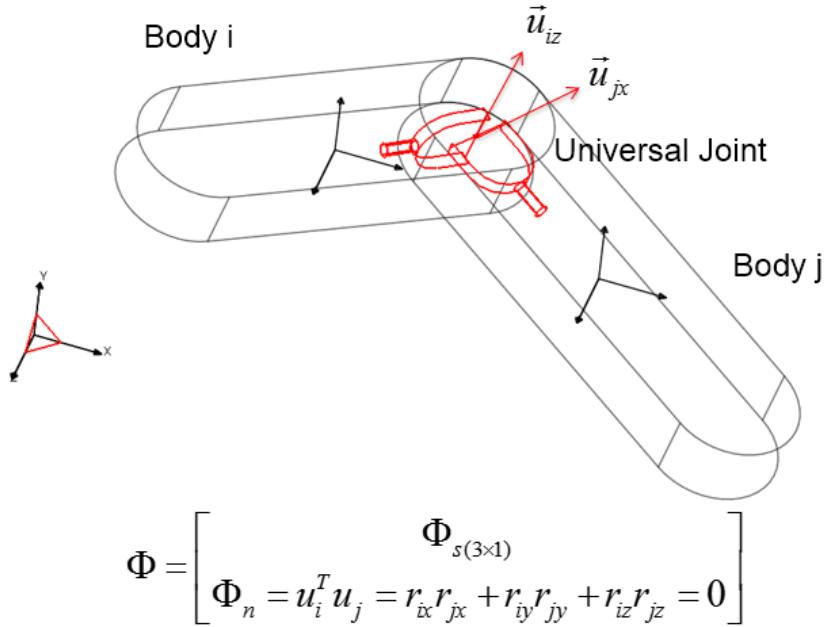


Figure 69 위치와 각도 조건식을 이용한 Universal Joint의 조건식

지금까지 알아본 바와 같이 Joint의 구속식은 해당 방향의 벡터에 대해 수학적인 조건을 만족시키도록 구성한다. 이는 물체가 가진 자유도를 하나씩 제거하는 의미이며, 제거되는 자유도와 수식의 개수는 동일하다. 이는 다르게 말하면 Joint의 구속식은 시스템의 자유도의 개수보다 많이 사용될 수 없다. 강체의 경우 두 물체 사이에 존재하는 자유도는 60이며 Joint 구속식은 6개를 초과할 수 없음을 의미한다. 만약 Joint에 의한 구속식의 개수가 물체의 자유도보다 많아지면 이를 과구속(redundant constraint)이라 하며, RecurDyn은 자동으로 필요 없는 구속식을 제거하게 된다. 차후 이 관계에 대해 보다 면밀하게 알아보자.

2) Joint와 Marker

Joint는 Body에 정의된 한 점과 벡터에 의해 계산된다. 따라서 이러한 정보를 Solver로 전달해 줄 요소가 필요하다. RecurDyn에서는 Marker가 이 역할을 담당한다. Marker는 위치와 자세를 가지고 있으며 이 정보를 통해 Joint의 구속식이 만들어 진다. 따라서 Marker는 Joint 생성에 있어 필수적인 요소라 하겠다.

RecurDyn에서 Joint를 생성시키면 Base와 Action Body에 자동으로 Marker가 생성되어 각각 Joint의 Reference가 된다.

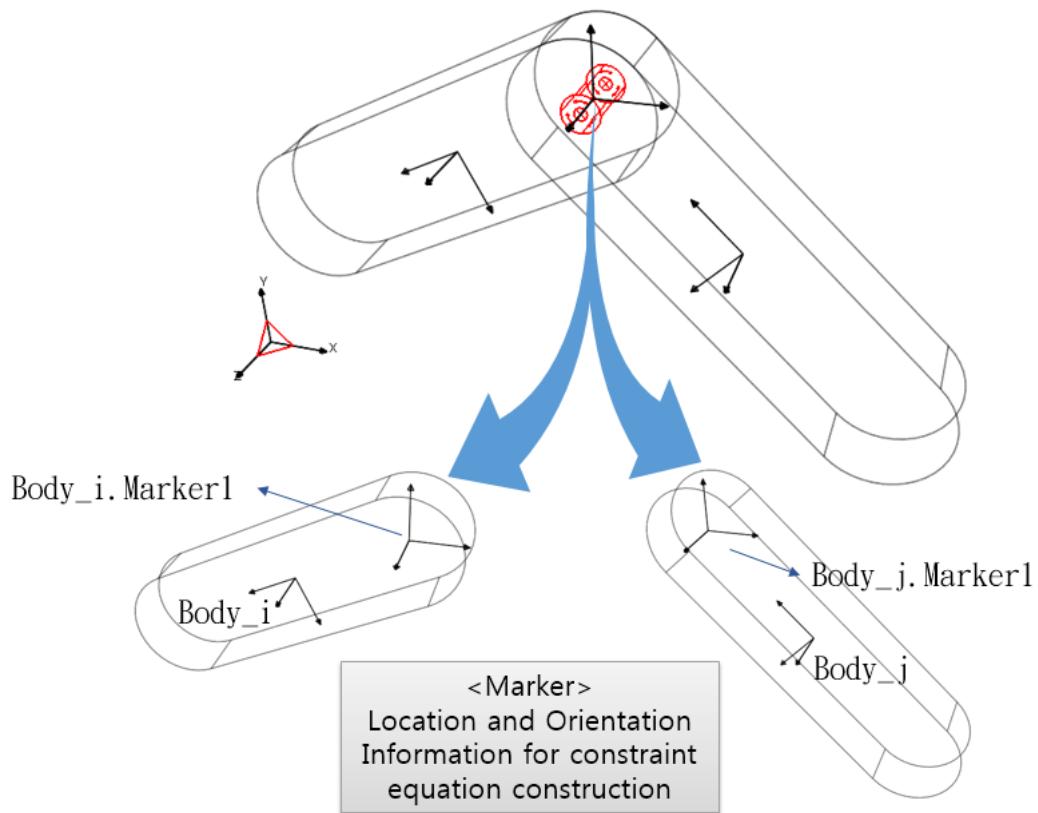


Figure 70 Joint와 Marker의 관계

3) Joint 생성 방법

Joint를 생성하는 일반적인 방법은 연결할 두 Body와 연결위치 그리고 특정 축을 정의하는 것이다. RecurDyn은 Joint 생성시 몇 가지 생성 옵션을 제공하는데 이는 생성의 편의성을 위해 제공되는 것이며 생성된 Joint 자체가 달라지는 것은 아니다.

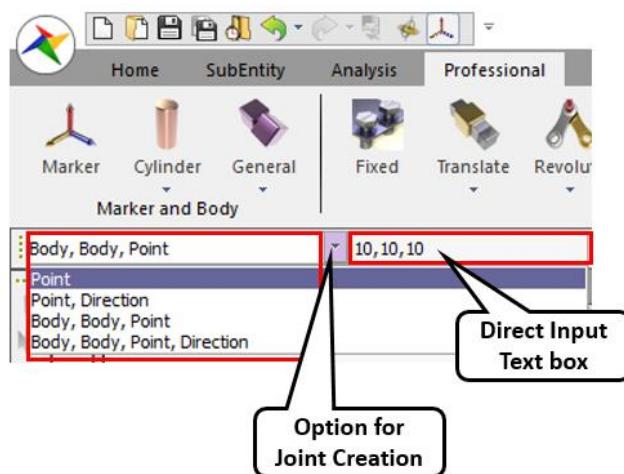


Figure 71 Joint생성 옵션

- Point

Working window에서 하나의 Point를 선택하면 해당위치에 있는 2개의 Body를 자동으로 Action과 Base Body로 선택하고 Point위치에 Joint가 생성되며, 축은 Working Plane의 Normal한 방향으로 자동 입력된다

- Point, Direction:

Point와 동일한 방법으로 생성되지만 축 벡터를 사용자가 임의로 정의할 수 있다.

- Body, Body, Point

Action Body와 Base Body를 직접 선택하고 Point 위치에 Joint가 생성되며, 축은 Working Plane의 Normal한 방향으로 자동 입력된다

- Body, Body, Point, Direction

Action Body와 Base Body를 직접 선택하고 Point 위치에 Joint가 생성되며, 축 벡터를 사용자가 임의로 정의할 수 있다.

Direct Input Text Box는 Point 또는 벡터를 선택할 때 사용자가 직접 좌표나 벡터 값을 입력할 수 있는 기능을 제공한다. 사용법은 해당 작업순간에 Working Window에서 Point나 벡터를 선택하는 대신에 직접 Textbox에 값을 입력하고 Enter버튼을 누르면 작업이 완료된다.

※ Joint 생성시 사용하는 옵션 중 Point나 Point, Direction 기능은 주로 2D 모델링에서 사용되며, 일반적으로는 Default값인 Body, Body, Point 이다. 생성 시 현재 해야 할 작업에 대한 설명은 Status Bar(Figure 16참조)에 있는 설명을 보면 알 수 있다.

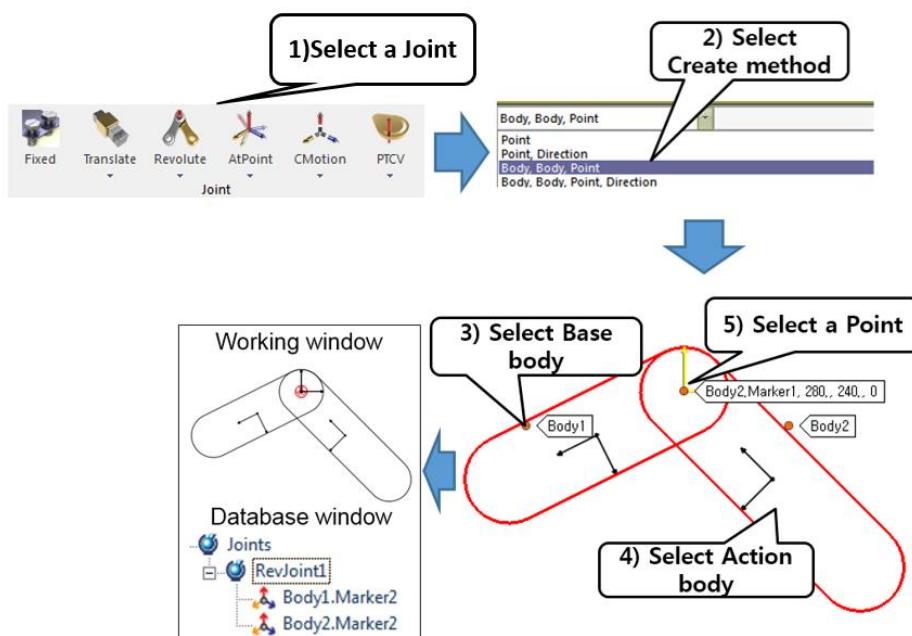


Figure 72 Joint생성과정

4) Joint의 수정 및 이동

Joint의 위치와 자세를 수정하는 방법은 2가지가 있다. 첫 번째는 Joint Entity의 Property 창에서 직접 Location과 Orientation 값을 조정하는 방법이며 두 번째는 Object Control을 이용하여 수정하는 방법이다. 두 가지 방법 모두 효과적이지만 Location과 Orientation을 직접 입력하는 방법이 좀더 명확한 입력방법이라 할 수 있다.

(1) Joint 직접 수정 방법

Joint의 Property 창을 열어 직접 좌표와 자세를 입력하는 방법으로서 Working window의 Joint Entity를 선택 후 ‘p’ 버튼을 누르거나 마우스 오른쪽 버튼을 눌러 Property 메뉴를 선택하여 Property 창을 열어 수정한다.

Property 창에서 수정하는 방법은 사용자가 직접 좌표를 입력할 수 도 있으며, Working Window 상의 Point, Edge 또는 Grid의 한 점을 선택하여 입력할 수도 있다.

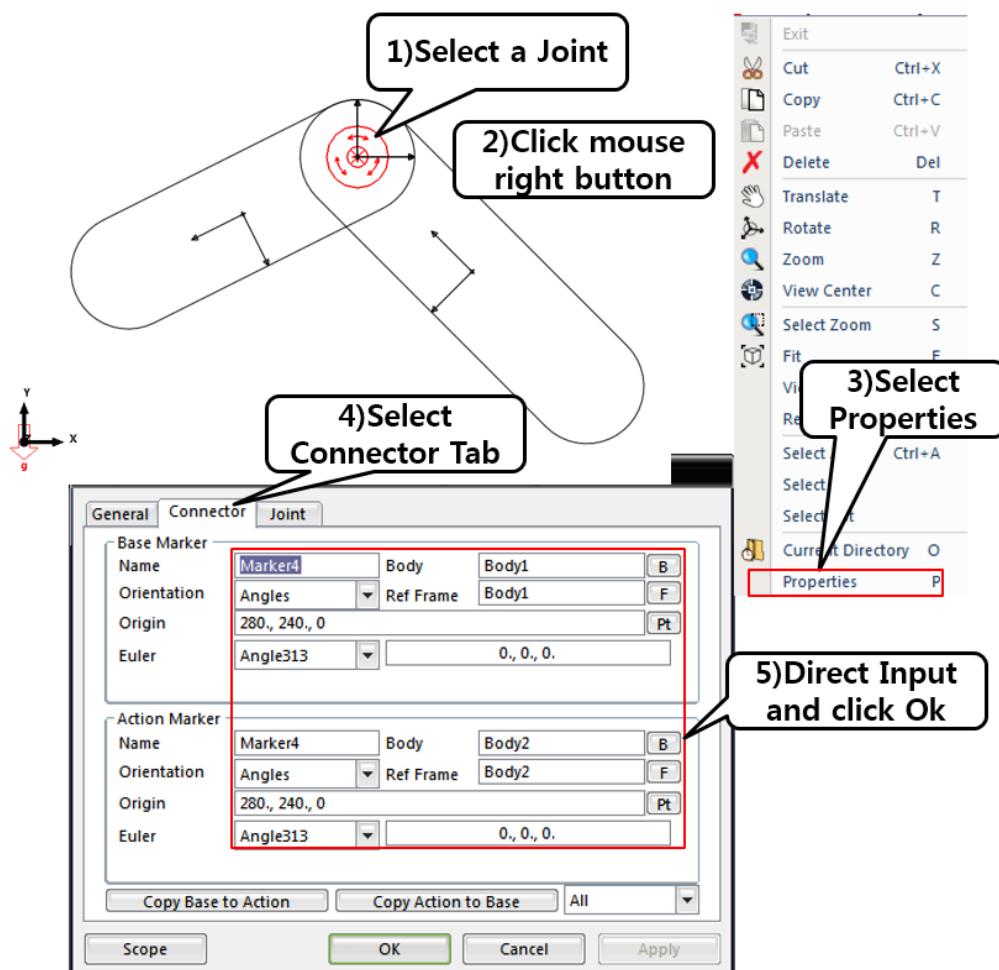


Figure 73 Joint property 창을 이용한 직접 수정 방법

Joint의 위치와 자세를 수정하기 위해 Base Marker와 Action Marker 모두 수정해야

한다. 이 때 편리하게 수행할 수 있는 기능이 Copy Base to Action이나 Copy Action to Base 버튼이다.

- Copy Base to Action

Base Marker의 좌표와 자세를 Action Marker로 Copy하는 기능

- Copy Action to Base

Action Marker의 좌표와 자세를 Base Marker로 Copy하는 기능

Copy 기능을 사용할 때 단순히 수치만 복사하는 것이 아니라 Global 관점에서 동일한 위치와 자세가 되도록 Body Coordinate에 대한 좌표와 자세로 바꾸는 작용을 하기 때문에 이 기능을 사용한 후, Action Marker와 Base Marker의 Text Box에 입력된 내용이 서로 다를 수 있다. 그러나 이는 정상적인 입력결과이다.

(2) Object Control을 이용하는 방법

앞서 설명한 Object Control의 기능을 이용하는 방법으로서 Joint가 참고하고 있는 두 Marker를 Object Control Entity로 선택한 후 이동 및 회전 시키는 방법이다.

이 방법에서 가장 중요한 것은 Control Object로 Joint를 선택하는 것이 아니라 Joint의 Action Marker와 Base Marker를 선택하는 것이다. Joint만 선택하고 Operation을 수행하면 Joint에는 아무런 변화가 나타나지 않는다.

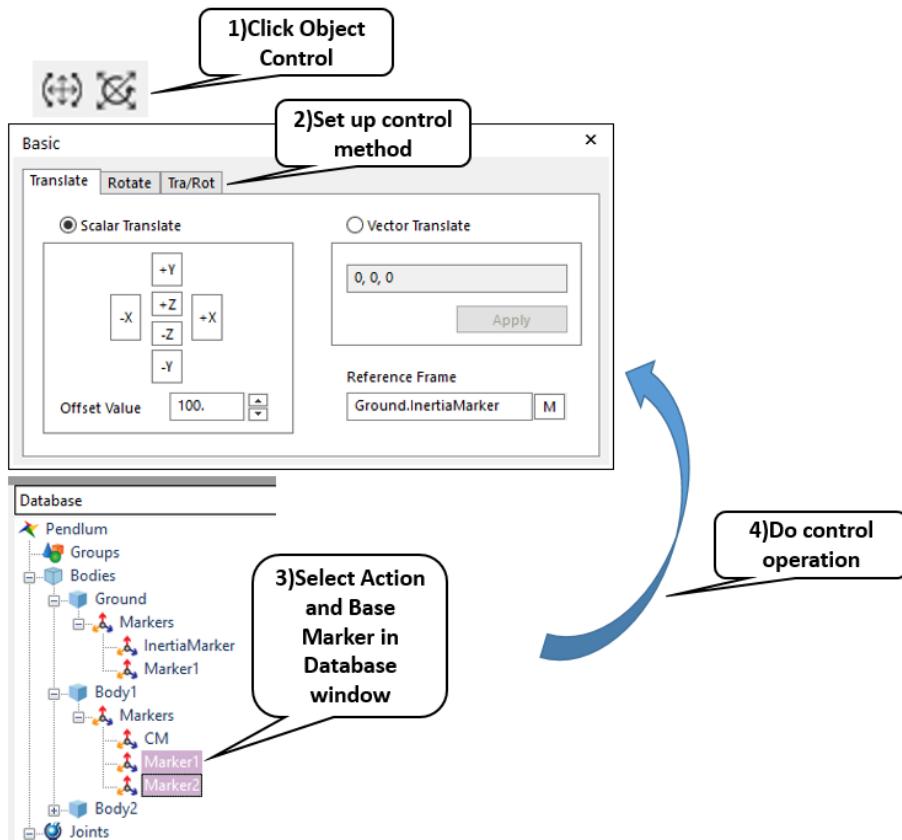


Figure 74 Object Control을 이용한 Joint 설정 방법

5) 기타 Joint 옵션

Joint는 초기 위치나 Motion 또는 마찰력과 같은 다양한 입력상태를 구현할 수 있으며, Joint의 Property 창을 열면 General Tab과 Connection Tab 그리고 Joint Tab으로 구성된 UI에 각 옵션을 설정하는 기능이 포함되어 있다.

아래의 그림에 각 버튼의 기능이 설명되어 있으며, 보다 상세한 기능은 Workshop을 통해 이해하도록 한다.

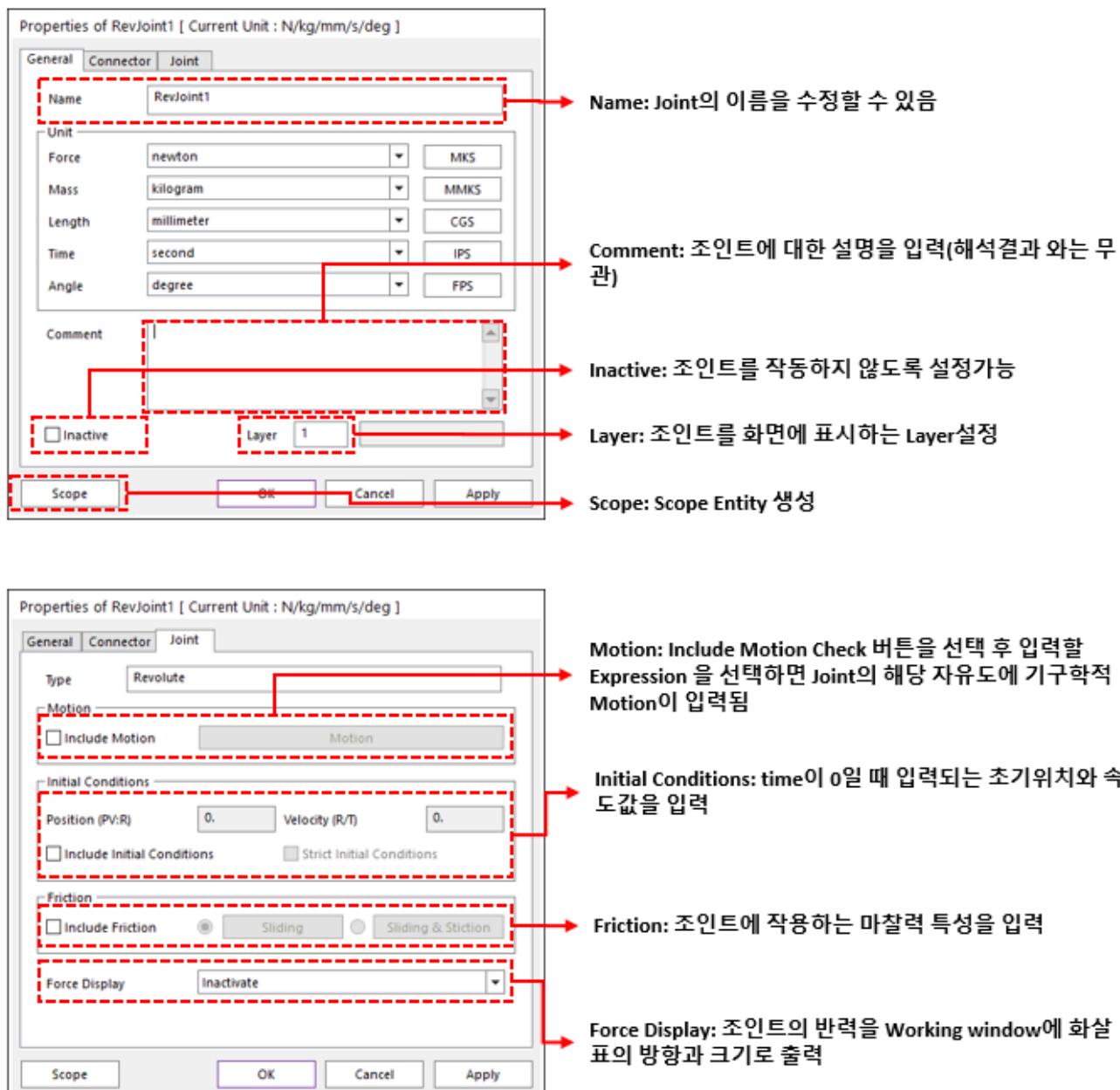
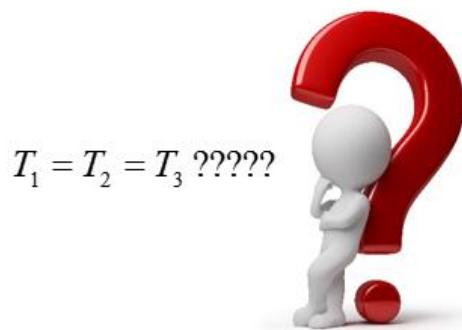
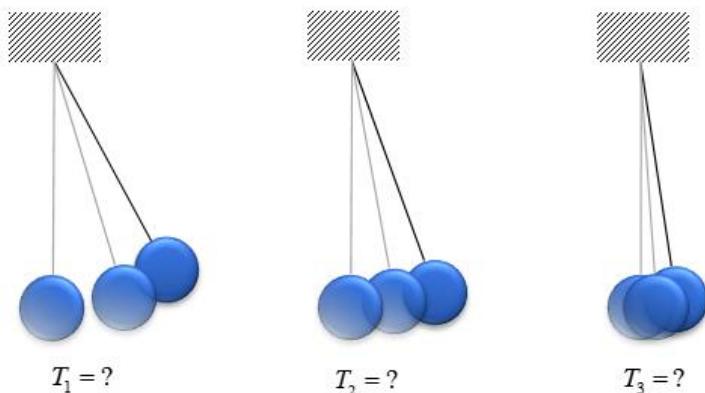


Figure 75 다양한 Joint 옵션

3. 단진자 모델 해석적 풀이

1) 단진자의 주기 문제

단진자 모델은 동역학 문제나 진동 문제를 이야기할 때 빼놓고 지나갈 수 없는 가장 보편적인 예제 중의 하나이다. 단진자의 운동은 중력의 방향은 일정하지만 진자의 운동방향이 지속적으로 바뀌기 때문에 비선형적 하중이 입력되는 상황이다. 그런데 우리는 상식적으로 단진자의 주기는 진자의 길이에 의해 결정된다고 배워왔다. 물론 전제가 있기는 하다. 진자의 길이에 비해 변위가 작을 경우에 한해서다. 진자는 초기 위치를 어디에 두느냐에 따라 변위가 달라진다. 에너지 보존법칙에 따라 초기 위치로 돌아오기 때문에 최초 변위만큼 지속적으로 진동할 것이다. 그렇다면 과연 진자의 진동주기는 초기 위치에 따라 어떻게 다르게 나타날까?



The pendulum period depends on the length only?

Figure 76 단진자 주기 문제

2) 단진자 모델의 운동방정식

단진자의 주기 문제에 대해서는 이미 오래 전에 수학적으로 밝혀졌으며 그 수학적 전개를 소개한다. 우선 뉴턴 동역학을 이용하여 운동방정식을 유도하기 위해 Global z축을 중심으로 원통 좌표계(cylindrical coordinate)를 사용한 자유물체도를 그릴 수 있다. 그리고 변수정의를 위해 반경방향의 벡터를 r 그리고 접선방향의 벡터를 s 로 둔다. 질량과 중력에 의한 힘 F 를 s 방향에 대한 식으로 바꾸면 $F = -mg \sin \theta$ 이 된다.

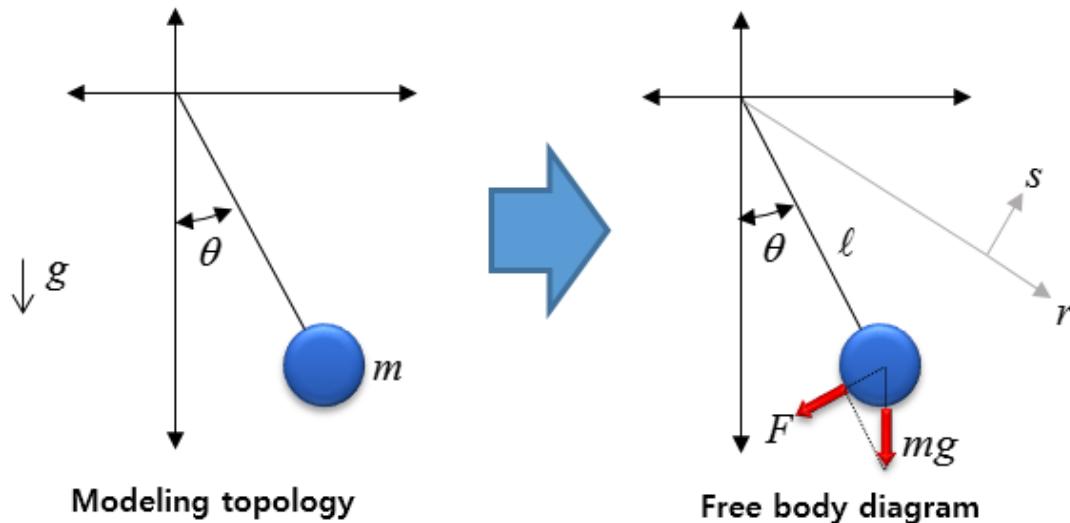


Figure 77 단진자 모델의 자유물체도

이제 뉴턴의 제2법칙($F = ma$) 힘과 가속도의 관계를 이용하여 수식을 유도하면 다음과 같다

$$m\ddot{s} = -mg \sin \theta$$

여기서 m 을 소거하면 간단한 식이 성립한다.

$$\ddot{s} = -g \sin \theta$$

그리고 s 의 이동거리는 $\ell\theta$ 로 표현할 수 있다.

$$s = \ell\theta \Rightarrow \dot{s} = \ell\dot{\theta} \Rightarrow \ddot{s} = \ell\ddot{\theta}$$

그리고 이 식을 시간에 대해 두 번 미분하면 다음과 같이 정리 할 수 있으며, 최종적으로 운동방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\ddot{\theta} = -\frac{g}{\ell} \sin \theta$$

이 식은 단진자의 작동상태가 초기 각도와 중력의 크기 그리고 진자의 길이 ℓ 에 의해

지배되는 것을 알 수 있다.

3) 단진자의 진동주기 계산

운동방정식에서 θ 의 각도가 미소할 경우 $\sin\theta \approx \theta$ 로 둘 수 있으며 $\ddot{\theta}$ 에 대해 수학적으로 적분을 하면 cosine함수 식이 된다.

$$\ddot{\theta} = -\frac{g}{\ell}\theta \Rightarrow \theta(t) = \theta_0 \cos\left(\sqrt{\frac{g}{\ell}}t\right)$$

한번의 주기를 T로 보면 Cos함수 내부의 값은 2π 가 되므로 아래와 같이 정리할 수 있다.

$$2\pi = \sqrt{\frac{g}{\ell}}T \Rightarrow T = 2\pi \sqrt{\frac{\ell}{g}}$$

그러나 이 식은 맥클로닌 급수(McLaurin series)에 가정($\sin\theta \approx \theta$)에 의해 한계를 가진다. 실제로 이러한 가정이 없이 복잡한 미분방정식을 유도하면 아래와 같은 식을 얻을 수 있다.

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}} \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \left[\left(\frac{(2n)!}{(2^n \cdot n!)^2} \right)^2 \cdot \sin^{2n} \left(\frac{\theta_0}{2} \right) \right]$$

본 장에서는 이 단진자 모델이 가지는 주기에 대해 단순 계산식에 의한 주기와 RecurDyn 모델에 의한 수치해석적인 해를 비교하여 RecurDyn의 계산결과에 대한 특성을 알아본다.

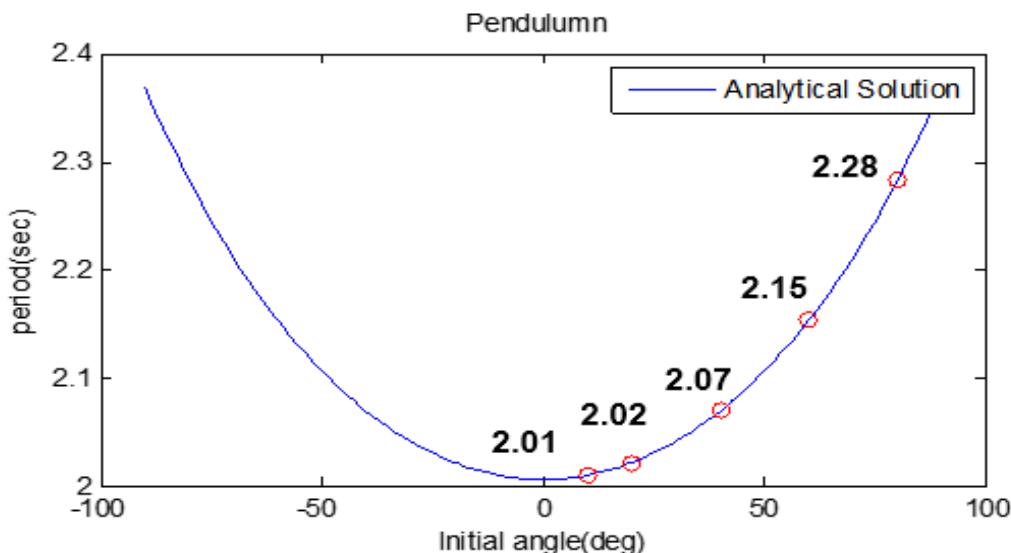


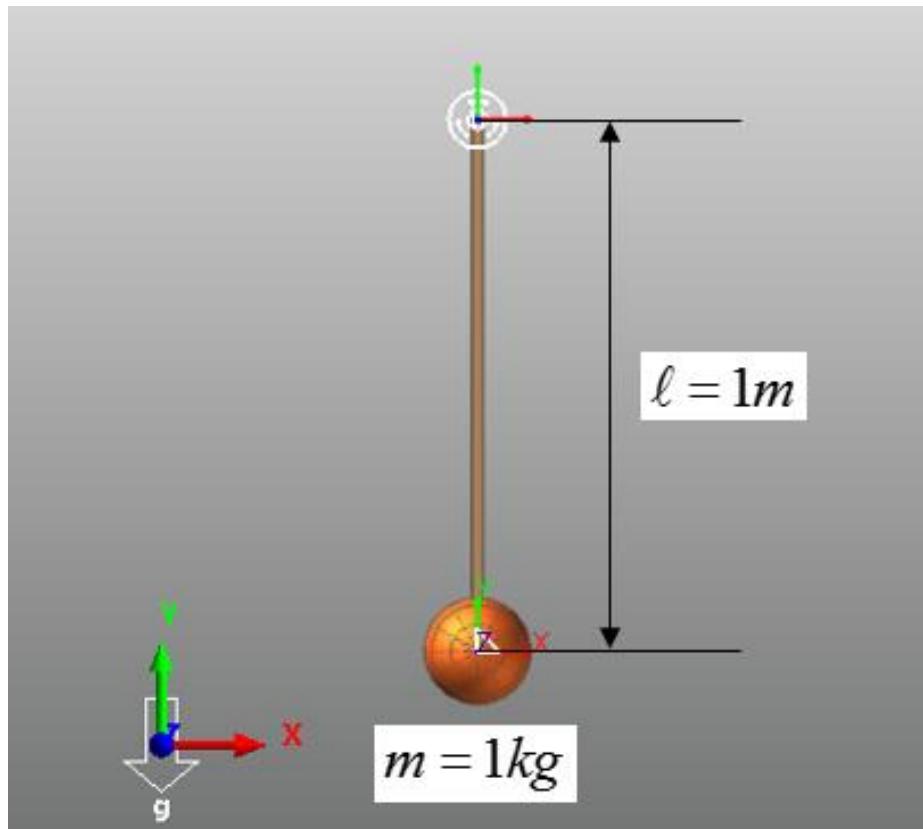
Figure 78 길이 1m일 때 초기 각도에 따른 단진자의 주기에 대한 해석적 결과

Workshop 5 Simple Pendulum

내용: 단진자에 대한 모델링을 수행하고 다양한 초기상태에 대한 진자의 진동주기를 분석하여 이론적인 계산결과와 비교해 본다.

본 워크샵을 통해 아래의 관련기능을 익힐 수 있다

- Joint Initial Condition을 이용한 해석방법
- Simulation 결과 저장 Folder 및 파일명 설정
- Analysis Tab을 이용한 FFT분석법



수행시간	40분
난이도 Level	1

Workshop 수행을 위해 필요한 사항

- RecurDyn Professional

STEP 1 단진자 모델을 구성할 수 있는 단순한 형태의 Geometry인 Ellipsoid와 Link의 모델링

1. RecurDyn을 시작한 후 ‘pendulum’이라는 이름으로 새로운 모델을 생성

Name: pendulum

Unit: MMKS

Gravity: -Y

2. Grid를 On 

3. Body에서 Link를 선택 후, 생성 옵션은 Point to Point로 선택하고, Working Window에서 (0,0,0)과 (0,-1000,0)을 Click

4. 생성된 Body1을 더블 클릭하여 Body Edit Mode로 진입

5. Working Window에서 Link1을 선택하고 ‘p’ 버튼을 눌러 Property Edit 창을 염

6. Link Property Edit 창에 아래와 같이 내용을 입력한 후 Ok버튼을 누른다

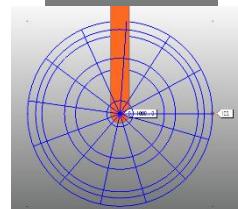
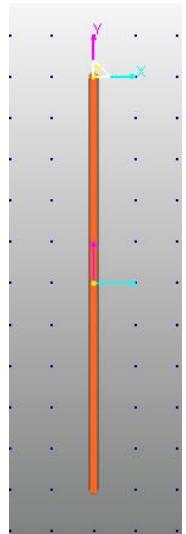
First Radius: 10

Second Radius: 10

Depth: 10

* 각 값은 4장 2) 절의 Link Geometry의 설명 참조

7. 현재 Body Edit mode상태에서 Ellipsoid를 Click 한 후, (0,-1000,0)을 클릭하고, (100,-1000,0)에 두 번째 클릭하여 Ellipsoid Geometry를 생성

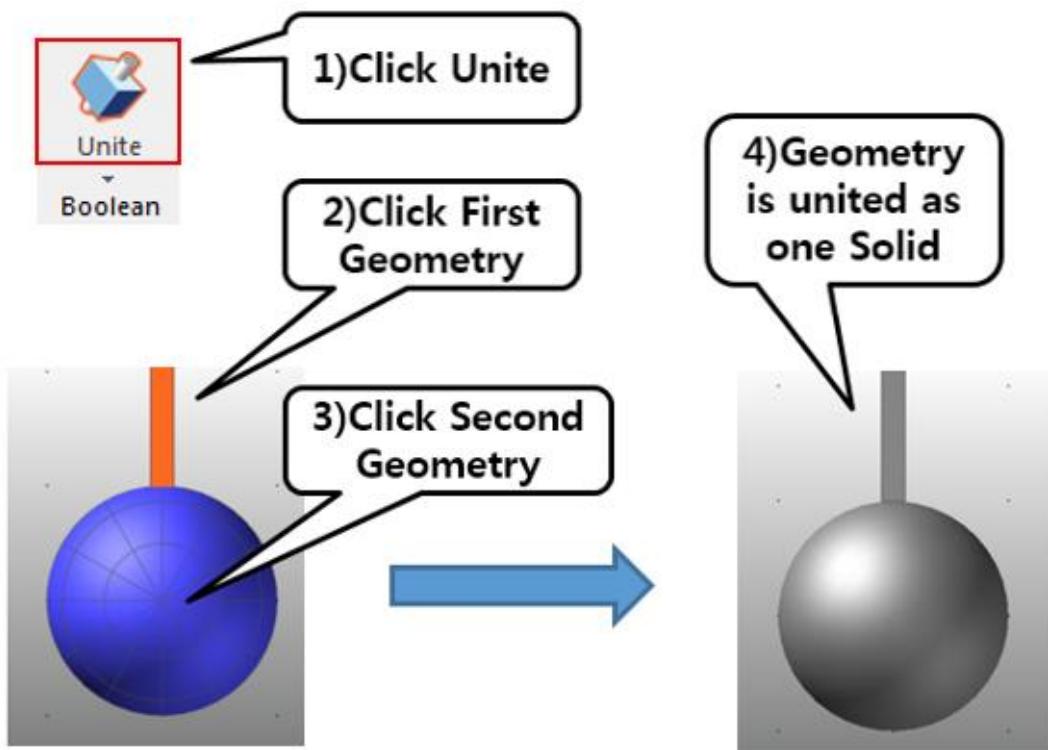


8. Geometry Tab에 Boolean 메뉴의 Unite를 선택 후, Working Widow의 두 Geometry를 선택 (Body Edit Mode에서 Boolean 작업을 수행 할 경우 Geometry 선택의 우선순위는 상관 없음)

* 두 Geometry가 합쳐지면 하나의 Solid로 인식하며 Geometry의 부피를 이용한 질량과 관성모멘트의 계산시 질량이 중복되어 입력되는 것을 방지 할 수 있다.

→ 다음 Page의 그림 참조

9. ‘Exit’ 버튼을 눌러 Body Edit Mode를 빠져 나옴



10. Database Window에서 'body1'을 선택하고 Property Edit 창을 열어 General Tab에서 Name을 'Pendulum'으로 수정

11. Body Tab에서 Material Input Type을 User Input으로 설정

12. 질량 관성정보를 아래와 같이 입력 후 Apply버튼 클릭

Mass: 1

Ixx: 0.001 Ixy: 0

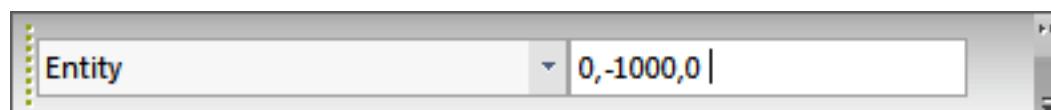
Iyy: 0.001 Iyz: 0

Izz: 0.001 Izx: 0

13. Center Marker의 위치를 수정하기 위해 CM 버튼을 누름

14. CM Property Edit창이 나타나면 Origin & Orientation Tab에 있는 Origin 메뉴의 Pt 버튼 ()을 누르고 Working Window의 (0,-1000,0)을 클릭

* 화면을 적절한 위치와 각도로 옮기면 Grid에 있는 (0,-1000,0) 위치의 점을 선택할 수 있다. 그러나 이를 불편하게 생각한다면 Direct Input 창을 활용할 수 있다. 이때는 Pt 버튼을 누른 후 Direct Input 창에 0,-1000,0 을 입력하고 Enter 버튼을 누르면 된다



15. 입력완료 후 Ok 버튼을 눌러 CM Property Edit 창을 빠져 나옴

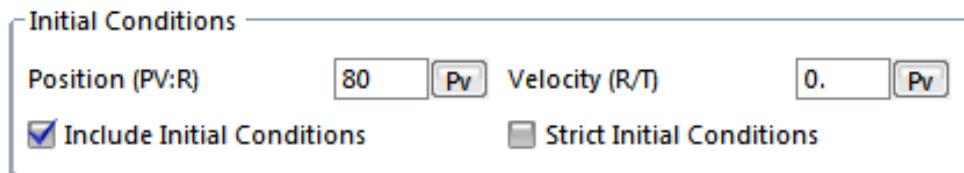
16. Body Property 창의 Ok버튼을 눌러 창을 빠져 나옴

STEP 2 Joint 생성 및 Joint Initial Condition 입력 후 해석

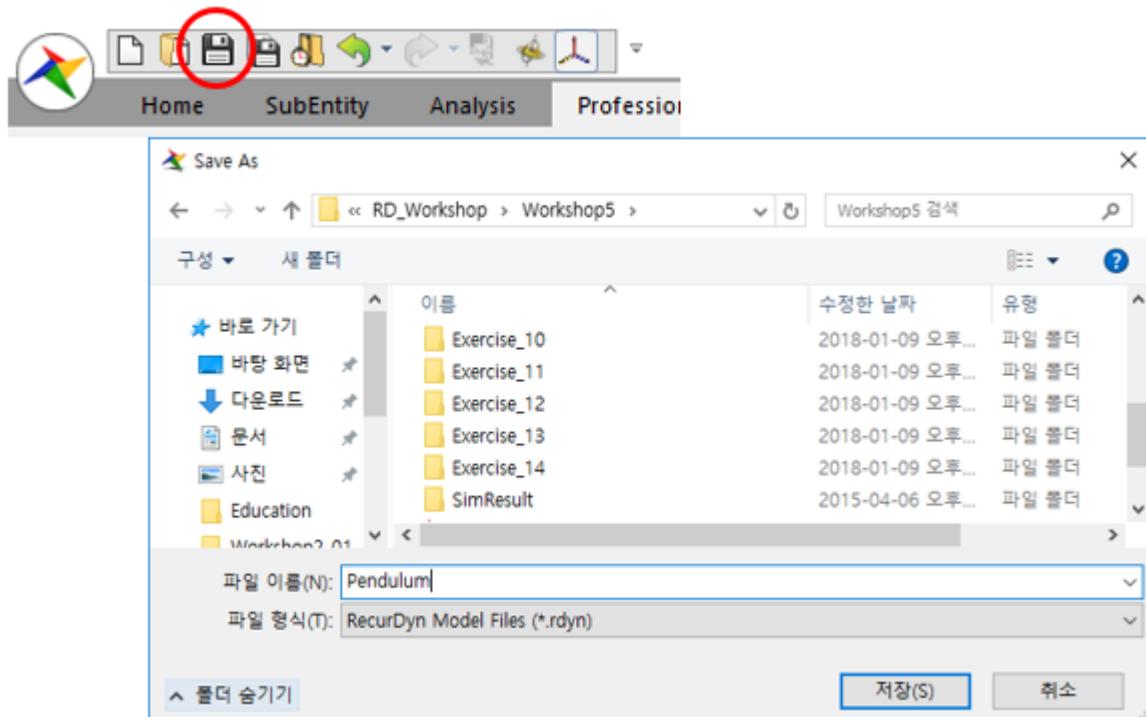
1. Professional Tab의 Joint Menu의 Revolute Joint 버튼을 누른 후 아래의 순서로 Click
Ground → Pendulum Body → (0,0,0)

※ 다양한 상태의 모델을 해석하기 위해 각 경우마다 새로운 모델로 생성하여 구성할 수도 있지만, 이는 매우 번거로운 작업이다. 따라서 본 장과 같이 Body의 최초 위치 및 자세가 다른 모델의 경우 조인트의 초기조건을 입력하여 해석의 시작 시점의 모델 상태를 변경할 수 있다.

2. Working Window의 Revolute Joint를 선택하고 ‘p’버튼을 눌러 Joint Property 창을 엽
3. Joint Property창의 Joint Tab에 Initial Conditions 항목에 있는 Include Initial Condition Check 버튼을 킁

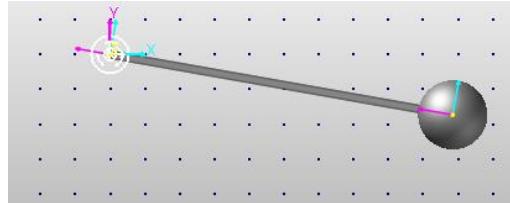


4. Position (PV:R)의 TextBox에 80°에 해당하는 값 80을 입력 후 Ok
5. 해석을 수행하기 위해서는 항상 모델이 저장되어 있고 Local Path가 정의되어 있어야 하므로 Save버튼을 눌러 모델을 사용자가 원하는 작업폴더에 저장



6. Analysis Tab의 Dyn/Kin 버튼을 누른 후 아래와 같이 설정 후 Simulate 버튼을 누름
End Time:20
Step:1000

7. Animation Control 메뉴에서 Animation을 Play
→ t=0일 때 80도 돌아간 상태에서 시작하는 것을
확인하고 해석과정을 이해



STEP 3 Output폴더 설정 및 Option변경

RecurDyn의 기본 설정은 매 해석시 폴더를 생성하고 생성한 폴더에 Solver 입력파일인 rmd와 해석 결과파일인 rplt파일이 생성된다. 여러 가지 해석결과를 동일한 폴더에 생성시키기 위해서는 설정을 변경하여 하나의 폴더에 rplt와 rmd가 생성되도록 하는 것이 편리하다. 본 단계는 이러한 설정을 변경하는 과정이다

1. Home Tab에서 Setting 메뉴의 Simulation 버튼을 눌러 Simulation 설정 창을 엽



2. Create Output Folder Check버튼을 끄고 Ok



3. Analysis Tab의 Dyn/Kin 버튼을 누른 후 Output File Name Check 버튼을 On 하고 TextBox에 ‘SimResult\Init80deg’ 라고 입력 후 Simulation버튼을 누름

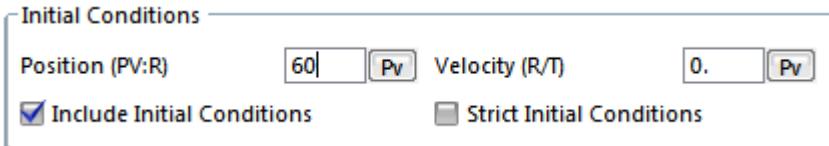
End Time	20.	Pv
Step	1000.	Pv
Plot Multiplier Step Factor	1.	Pv
<input checked="" type="checkbox"/> Output File Name	SimResult\Init80deg	

* Output File Name의 Check를 켜면 TextBox에 입력된 경로로 모든 해석 파일이 생성된다. 본 단계에서 입력한 ‘SimResult\Init80deg’ 문장에서 SimResult는 폴더명을 의미하며, Init80deg는 파일명이다. 구분자는 \이며, 동일한 형태로 ‘folder\folder\sub-folder\filename’ 형태와 같이 sub-folder에 해석 결과가 저장되도록 설정할 수 있다.

4. 탐색기를 열어 폴더와 생성된 파일명을 확인

STEP 4 Simulation 후 Trace Data 기능을 이용한 작동 주기 분석

1. Working Window의 Revolute Joint를 선택하고 ‘p’ 버튼을 눌러 Joint Property 창을 염
2. Joint Property 창의 Joint Tab에 Position (PV:R)의 TextBox에 60° 에 해당하는 값 60을 입력 후 Ok

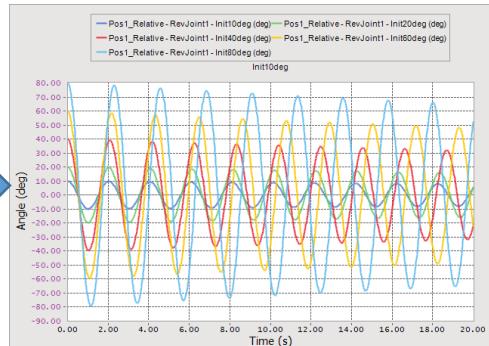


3. Analysis Tab의 Dyn/Kin 버튼을 누른 후, Output File Name에 ‘SimResultWInit60deg’라고 입력 후 Simulation 버튼을 누름
4. 동일한 과정을 반복하여 40 20 10도일 때의 상황을 해석
해석결과 파일의 이름은 Init40deg, Init20deg, Init10deg 와 같이 사용자가 확인할 수 있는 명료한 이름을 지정하면 향후 Post-processor에서 읽어 들일 때 선택하기 용이하다.
5. Plot_Result 버튼을 눌러 Post-Processor로 모드 전환

※ Plot_Result 버튼을 눌러 Post-processor로 전환하면 마지막에 해석했던 결과를 자동적으로 Plot Database Window에 입력된 것을 확인할 수 있다. 이처럼 해석 후 바로 Post-processor로 전환하면 마지막 해석 결과가 자동으로 읽어들여진다.

6. Database window에 10부터 80deg까지의 해석결과를 순서대로 로드.
이 과정은 탐색창에서 .rplt파일을 drag&drop하면 됨, 이 때 읽어 들여지는 순서는 Select순서와 Drag할 때 선택하는 파일명에 따라 결정된다. Init10deg부터 선택한 후 Init80deg까지 drag하고 마지막으로 Init10deg.rplt파일을 클릭한 상태에서 Moving하여 Post-processor에 drop하면 순서대로 읽어짐
7. Plot database창에서 Init10deg/joints/RevJoint1/Pos1_Relative를 선택한 후 마우스 오른쪽 버튼을 누르면 메뉴가 나타나며 이때 Multi Draw를 선택

해석결과에서 동일한 이름의 해석결과를 한번에 Plot

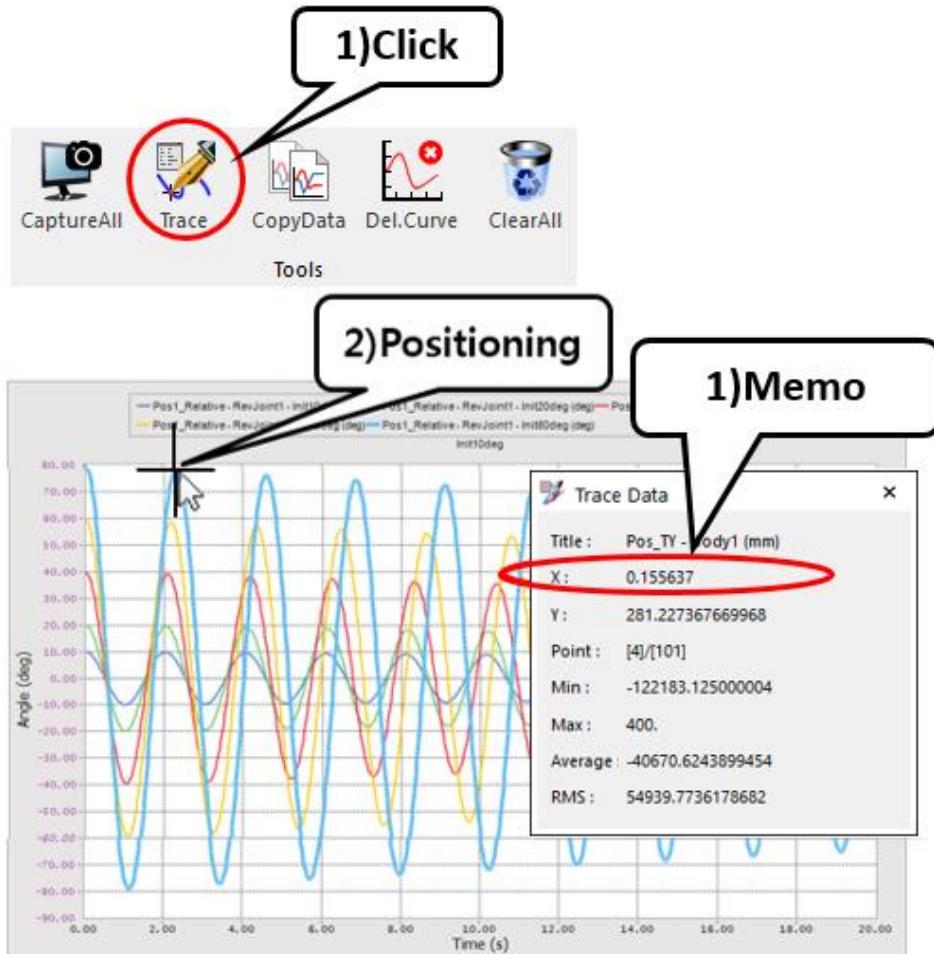


8. 모든 해석결과(시간에 대한 Joint 각도)가 그래프로 그려지는 것을 확인한 후, 단순한 방법을 이용하여 각 해석결과에 대한 진자의 고유진동수를 측정

※ 고유진동수를 측정하기 위해서는 Peak 값이 나타나는 시간 간격을 알면 된다. 두 번째 Peak 가 발생하는 시간을 1에 대해 나누면 주파수

9. Home Tab에 View menu에 있는 Trace Data 버튼을 누름

10. 그래프에서 Init10deg의 결과에서 두 번째 Peak값이 나타나는 시간(x)의 값을 추출
약 2.2878sec



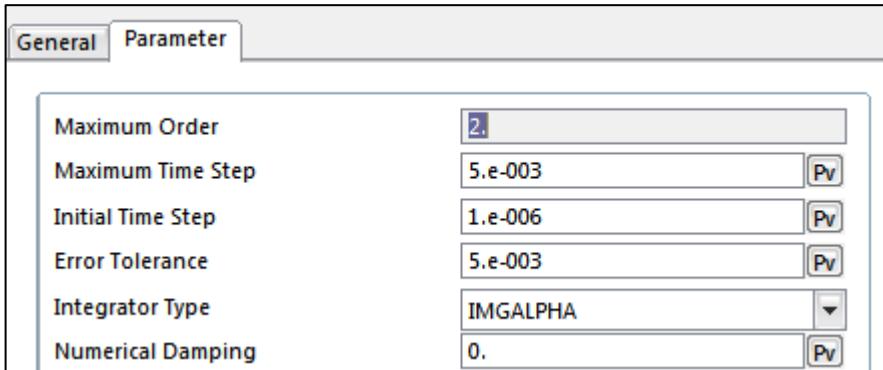
11. 동일한 방법으로 모든 해석결과의 작동 주기를 추출해본다.

Analysis	Init10deg	Init20deg	Init40deg	Init60deg	Init80deg
Exact dt	2.0102	2.0218	2.0693	2.1532	2.2824
RecurDyn					

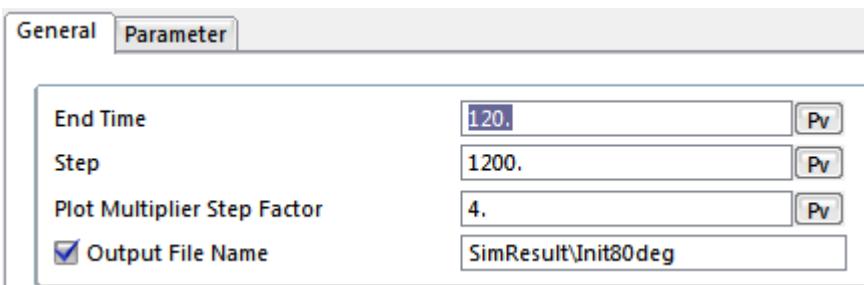
STEP 5 Tool Tab의 FFT기능을 이용하여 주파수 분석

FFT를 이용하여 주파수를 분석할 때는 가급적 해당 주파수 신호의 길이가 많이 반복될수록 좋은 FFT결과를 얻을 수 있다. 따라서 좀 더 긴 시간에 대해 시뮬레이션을 수행할 필요가 있다.

- Joint Property 창의 Joint Tab에 Initial Conditions 항목에 있는 Position (PV:R)의 TextBox에 80°에 해당하는 값 80을 입력 후 Ok
- Analysis Tab의 Dyn/Kin 버튼을 누른 후 Parameter Tab으로 이동 후 Maximum Time Step의 값을 0.005로 변경하고 Numerical Damping의 값을 0으로 변경



- General Tab에서 End time을 120으로 바꾸고 Step을 1200으로 변경, Plot Multiplier Step Factor를 4로 입력하고 Output File Name에 Init80deg로 입력 Simulate버튼을 눌러 해석수행



- 동일한 과정을 반복하여 60, 40, 20, 10도일 때의 상황을 해석
- Plot버튼을 눌러 Post-Processor로 모드 전환
- Database window에 10부터 80deg까지의 해석결과를 순서대로 로드

- Plot database창에서 Init10deg/joints/RevJoint1/Pos1_Relative를 선택한 후 마우스 오른쪽 버튼을 누르면 메뉴가 나타나며 이때 Multi Draw를 선택
- Tool Tab의 FFT버튼을 누름
- Data Analysis창이 나타나면 아래와 같이 설정 후 Execute버튼을 누름
 FFT_Type: Magnitude
 Source Curve1(F1) : 1:Pos1_Relative-RevJoint1 - Init10deg(deg)
 Plot to New Page: Yes
 Add to Database: Yes
 Use Default Curve Name: Yes
 Window Method: Square
 Number of Points: Auto

10. Page가 새로 생성되면서 FFT 결과가 나타나며, Plot Database 창에 User Data가 생성됨
11. 동일한 과정으로 Source Curve1(F1)의 내용을 Init20deg부터 80deg까지 바꾸어가며 Execute 실행
12. 완료 후 Close 버튼을 눌러 Data Analysis 창을 닫음
13. 생성된 Page에는 Init10deg부터 80deg까지의 FFT 데이터가 그려져 있다. 각 그래프의 Peak값이 존재하는 주파수를 확인해 보자
이 때 사용하는 기능 역시 TraceData 이다

Analysis	Init10deg	Init20deg	Init40deg	Init60deg	Init80deg
Exact freq.	0.4974	0.4946	0.4832	0.4644	0.4382
RecurDyn					

14. 추출된 주파수와 정해를 비교검토 해 본다.

초기각도 (deg)	Period (sec)	Frequency (Hz)
10	2.01023589260231	0.497454056849752
20	2.02179649720230	0.494609621385618
40	2.06929120140611	0.483257261868453
60	2.15324235178384	0.464415907095434
80	2.28227564248225	0.438159169464902

Chapter 6. Joint and Motion

Lecture:

4절 링크 모델의 구조 및 기구학적 Solution의 Exact Solution, Joint의 종류와 자유도 및 Joint Motion, Model Setting 기능 설명

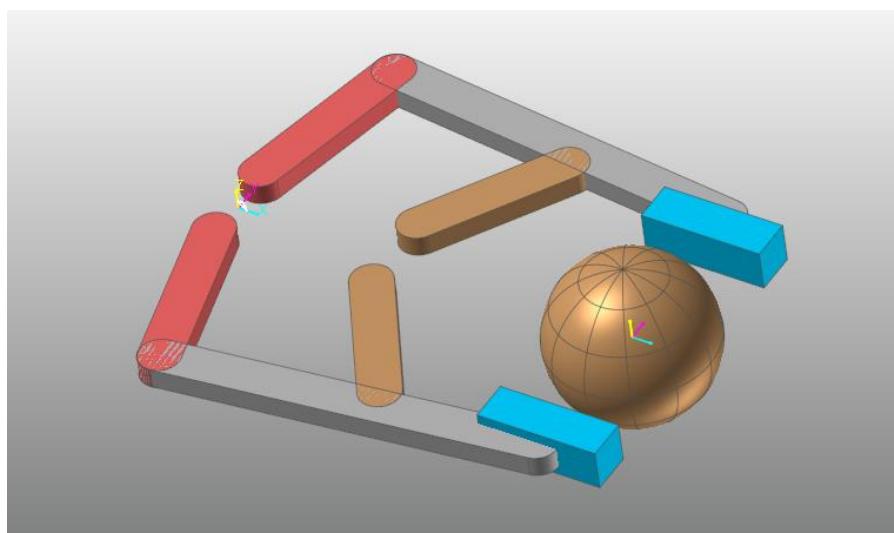
Workshop

4절 링크를 이용한 Robot의 4절 링크를 모델링(Body+ Joint+ Motion)한 후, 작동링크의 위치, 속도, 가속도 및 Joint을 그래프로 그려보고, Animation File을 출력



소요 시간

강의명	시간(분)
모델 Setting 설정방법	
Joint의 종류 및 자유도	
Joint 모션	30 분
4절 링크의 모델의 구조 및 기구학 솔루션	
Workshop	30 분
총합	60 분



1. Joint 종류 및 자유도

Joint 구속식에 대한 간략하게 소개하기 위해 몇 가지 Joint를 예를 들어 설명하고자 한다.

1) Joint의 종류

(1) Fixed Joint

Fixed Joint는 두 바디를 사용자가 정의한 위치에 고정하는 구속조건을 갖는다. Fixed Joint의 아이콘도 볼트로 체결한 형상을 하고 있으며 연결된 두 물체는 하나의 물체와 같이 작동한다. 두 물체 사이의 자유도를 모두 구속하므로 구속식은 총 6개이다

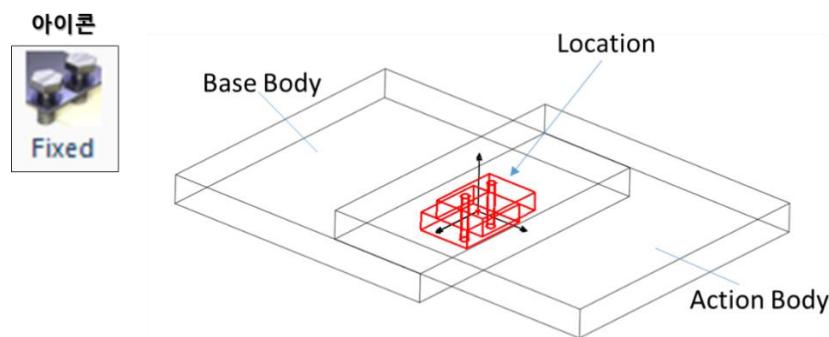


Figure 79 Fixed Joint

(2) Revolute Joint

Revolute Joint는 두 바디를 한 점에 위치를 고정하고 지정한 하나의 회전축에 대하여 회전 운동이 가능한 조인트이다. 두 바디가 공간상의 한 점에서 고정된다는 위치 조건식 3개와 회전축을 정의하기 위해 두 물체 각각 정의된 벡터가 서로 평행한 조건식 2개가 사용되므로 조인트 구속식은 총 5개이다

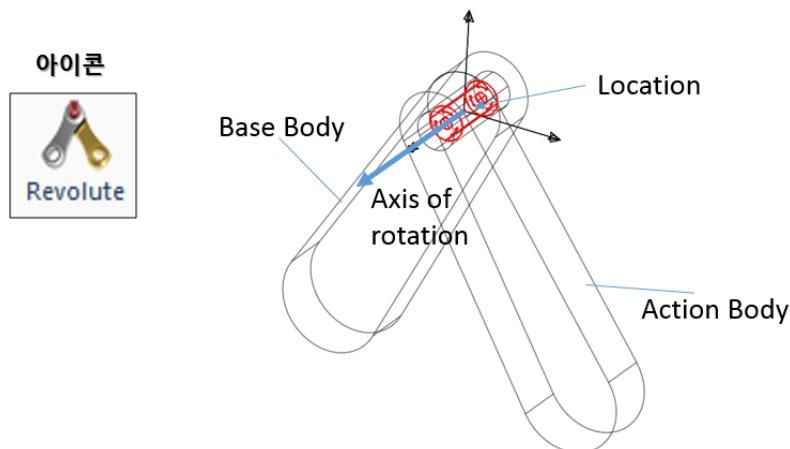


Figure 80 Revolute Joint

(3) Translational Joint

Translational Joint는 두 바디 사이에 지정한 벡터에 대해서 병진 운동이 가능한 조인트이다. 모든 방향에 대한 회전 운동은 구속되어 있고 오직 지정한 벡터 방향에 대한 병진운동만 가능하다. 병진 방향으로 2개, 회전에 대한 3개의 구속식을 가지므로 조인트 구속식은 총 5개이다.

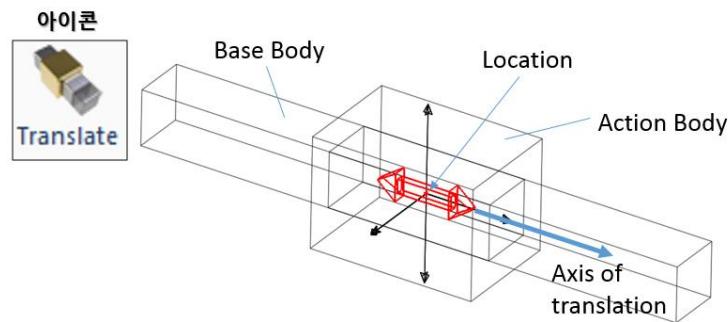


Figure 81 Translational Joint

(4) Planar Joint

Planar Joint는 지정한 평면상에서의 미끄러짐 운동이 가능한 조인트로서 두 방향의 병진 운동과 수직 축에 대한 회전만 가능하다. 병진 방향 1개와 회전방향 2개의 구속식을 가지므로 조인트 구속식은 총 3개이다.

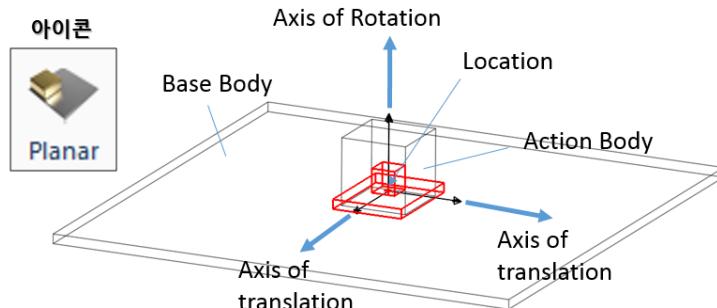


Figure 82 Planar Joint

(5) Spherical Joint

Spherical joint는 두 물체 사이의 한 점이 서로 이동하지 않으면서 회전만 가능한 조인트로서 조인트 구속식은 병진 방향 3개이다.

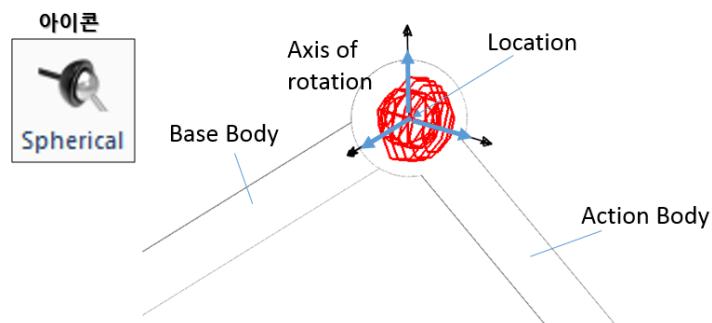


Figure 83 Spherical Joint

(6) Cylindrical Joint

Cylindrical Joint는 두 바디 사이에 지정한 회전축에 대해서 병진 운동과 회전 운동이 동시에 가능한 조인트이다. 병진 방향 2개와 회전에 대한 2개의 구속식을 가지므로 조인트 구속식은 총 4개이다.

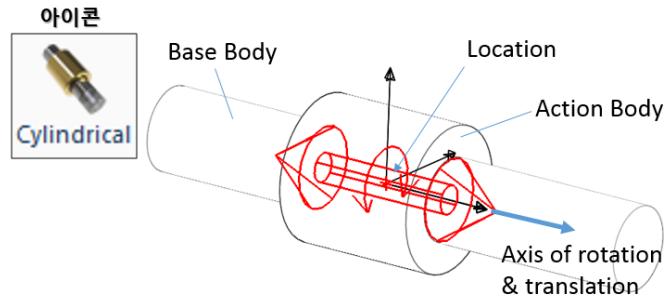


Figure 84 Cylindrical Joint

(7) Screw Joint

Screw Joint는 두 바디 사이에 지정한 회전축에 병진 및 회전운동이 동시에 발생하는 조인트로서 360도 회전에 대한 피치(Pitch) 길이만큼 병진 이동한다. Cylindrical Joint의 구속식 4개와 회전에 대한 병진이동 구속식 1개를 포함하여 구속식은 총 5개이다.

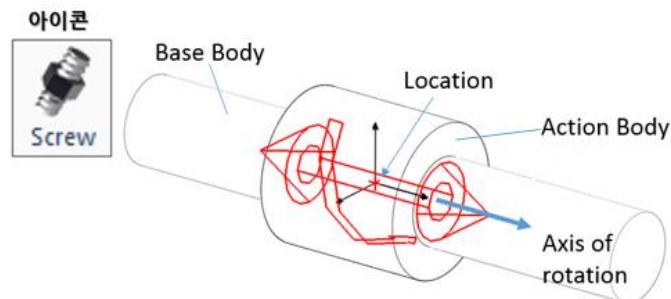


Figure 85 Screw Joint

(8) Universal Joint

Universal Joint는 연결된 위치의 직교하는 두 축에 대해 회전 가능한 조인트로서 병진 방향에 대한 구속 3개와 회전축이 서로 직교하는 구속식 1개를 포함하여 총 4개의 구속식을 가진다.

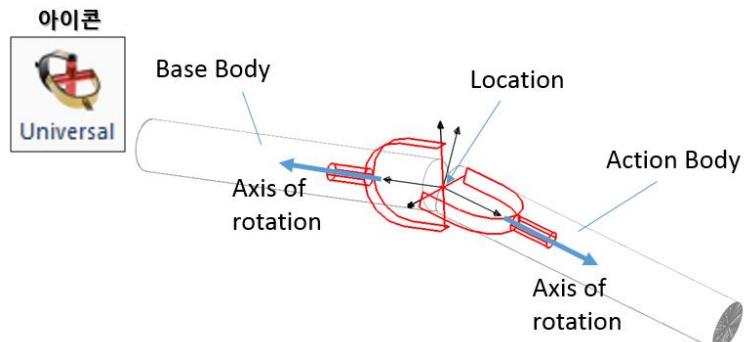


Figure 86 Universal Joint

(9) Constant Velocity Joint

Constant velocity joint는 두 축이 연결된 상태에서 각 축의 회전 속도를 동일하게 만드는 조인트이며 Universal Joint와 달리 기울어짐 각도에 따른 각속도의 변화가 발생하지 않는다. 병진방향 3개와 회전방향 1개로 구성된 총 4개의 구속식을 가진다.

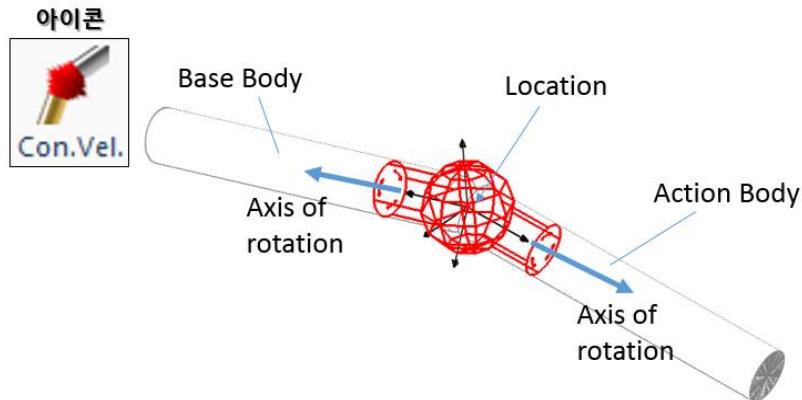


Figure 87 Universal Joint

2) Joint와 Body 그리고 자유도

다물체 동역학 모델은 Body, Joint 그리고 힘 요소로 구성된다. 구속식과 자유도를 아래 표에 나타내었다. 조인트 구속식의 개수를 잘 이해하는 것은 다물체동역학 모델링을 원활히 수행하고 과구속(redundant constraint)이 없는 모델링을 위해 반드시 필요한 정보이다.

조인트 종류	구속식	총구속식	총자유도수	자유도
Fixed	병진: 3, 회전: 3	6	0	-
Revolute	병진: 3, 회전: 2	5	1	회전 1
Translational	병진: 2, 회전: 3	5	1	병진 1
Planner	병진: 1, 회전: 2	3	3	병진 2, 회전 1
Cylindrical	병진: 2, 회전: 2	4	2	병진 1, 회전 1
Spherical	병진: 3, 회전: 0	3	3	회전 3
Screw	병진: 3, 회전: 2	5	1	회전 1
Universal	병진: 3, 회전: 1	4	2	회전 2
Constant Vel.	병진: 3, 회전: 1	4	2	회전 2

모델의 자유도는 Rigid Body의 개수와 조인트의 종류 및 개수에 의해 좌우된다. Body

의 자유도는 각 물체당 6개의 자유도를 가지며, 구속식의 개수는 조인트의 종류에 따른 구속식과 조인트 개수의 곱을 각 조인트 종류별로 더해가면 계산할 수 있다.

System 자유도 계산식:

$$\frac{\sum \text{Body Num.} \times 6 - \sum \text{Jnt Num} \times \text{Cnst Num.}}{\text{System DOF}}$$

4절 링크 모델의 자유도 계산 예제를 아래의 그림에 나타내었다. 모델의 전체 자유도는 1자유도이며 이는 4절 링크 시스템의 바람직한 모델링의 예라고 할 수 있다.

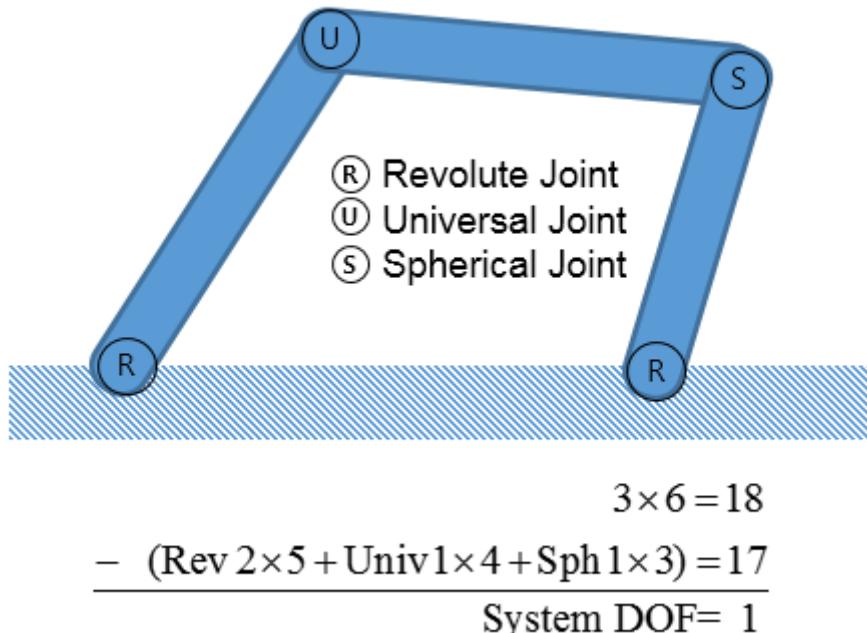


Figure 88 System DOF Calculation

다물체동역학 모델에서 시스템의 자유도는 0보다 큰 값이 나타나는 것이 바람직하다. 만약 0보다 작은 값이 나타나면 RecurDyn Solver가 수학적인 연산을 통해 가장 영향이 적은 자유도를 스스로 제거하여 계산하게 된다. 이러한 과구속 계산 방식을 이용하게 되면 사용자가 원치 않는 조인트의 자유도가 자동으로 제거되어 특정 조인트의 반력을 보고자 할 때, 그 결과가 0으로 계산되는 현상을 볼 수 있다. 따라서 매우 불확실한 조인트 연결상태일 경우 자유도가 0이 되도록 조인트를 구성하여야 한다. 만약 모델에 적합한 연결상태를 구현하기 어렵다면 Bush와 같은 힘 요소를 이용하여 조인트 모델을 구성하거나 Flexible Body를 이용하여 이러한 과구속 상황을 피할 수 있다.

2. Joint Motion

1) Joint Motion

Joint는 종류에 따라 병진 또는 회전 운동이 가능하다. 이러한 운동은 접촉이나 스프링과 같은 힘에 의해 이루어진다. 그런데 이러한 운동을 함수형태로 직접 정의하여 움직이고 싶을 경우 사용하는 것이 Joint 모션이다. RecurDyn에서 Joint모션은 Joint에 주어지는 추가적인 설정의 하나이며 이 설정이 Check되어 있는지에 따라 Motion이 작동한다. 모션을 입력할 수 있는 Joint는 Revolute, Translational, Cylindrical, PTCV가 있으며 Joint의 Property 창에서 Motion을 설정한다. Joint Motion이 없는 Joint의 자유도를 구속할 경우 CMotion(Cartesian motion) Entity를 이용하여 특정 자유도에 Motion을 입력한다.

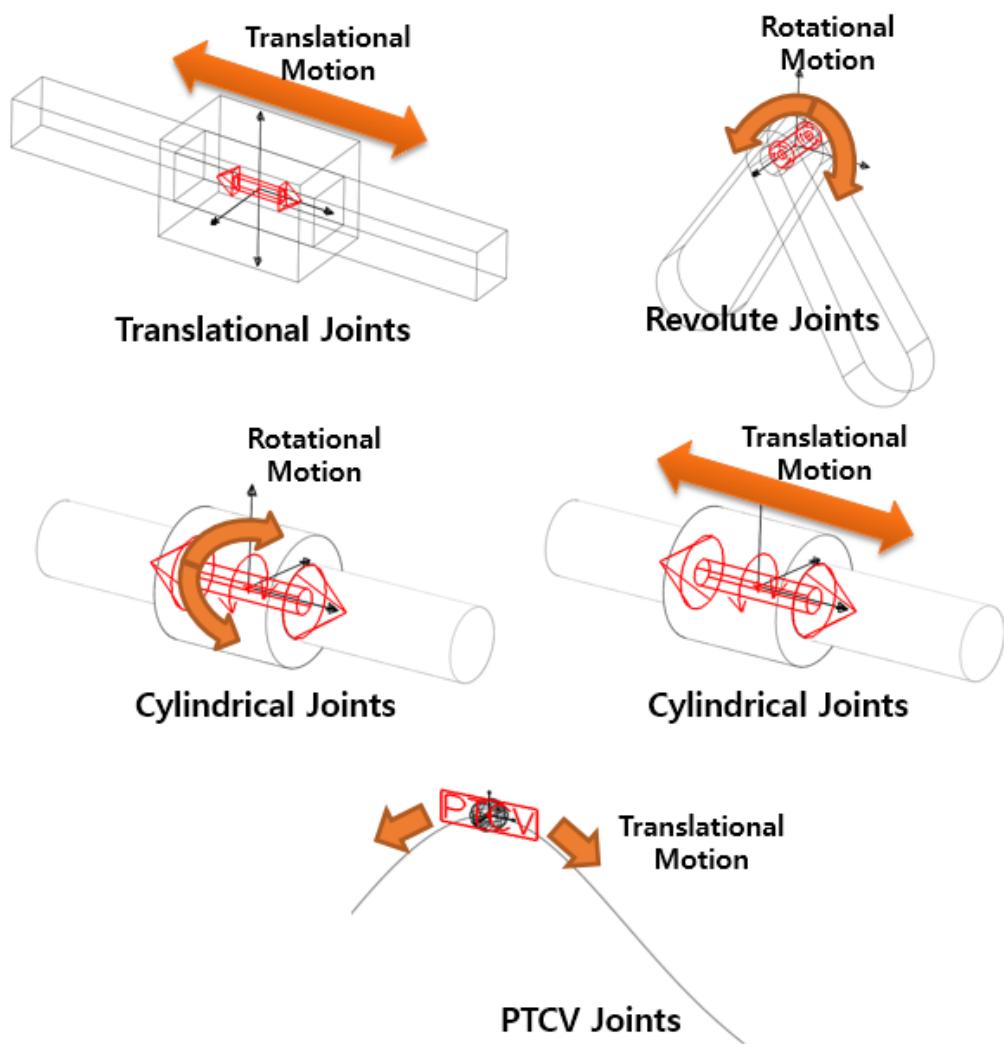


Figure 89 Joint Motion

2) Joint Motion 생성방법

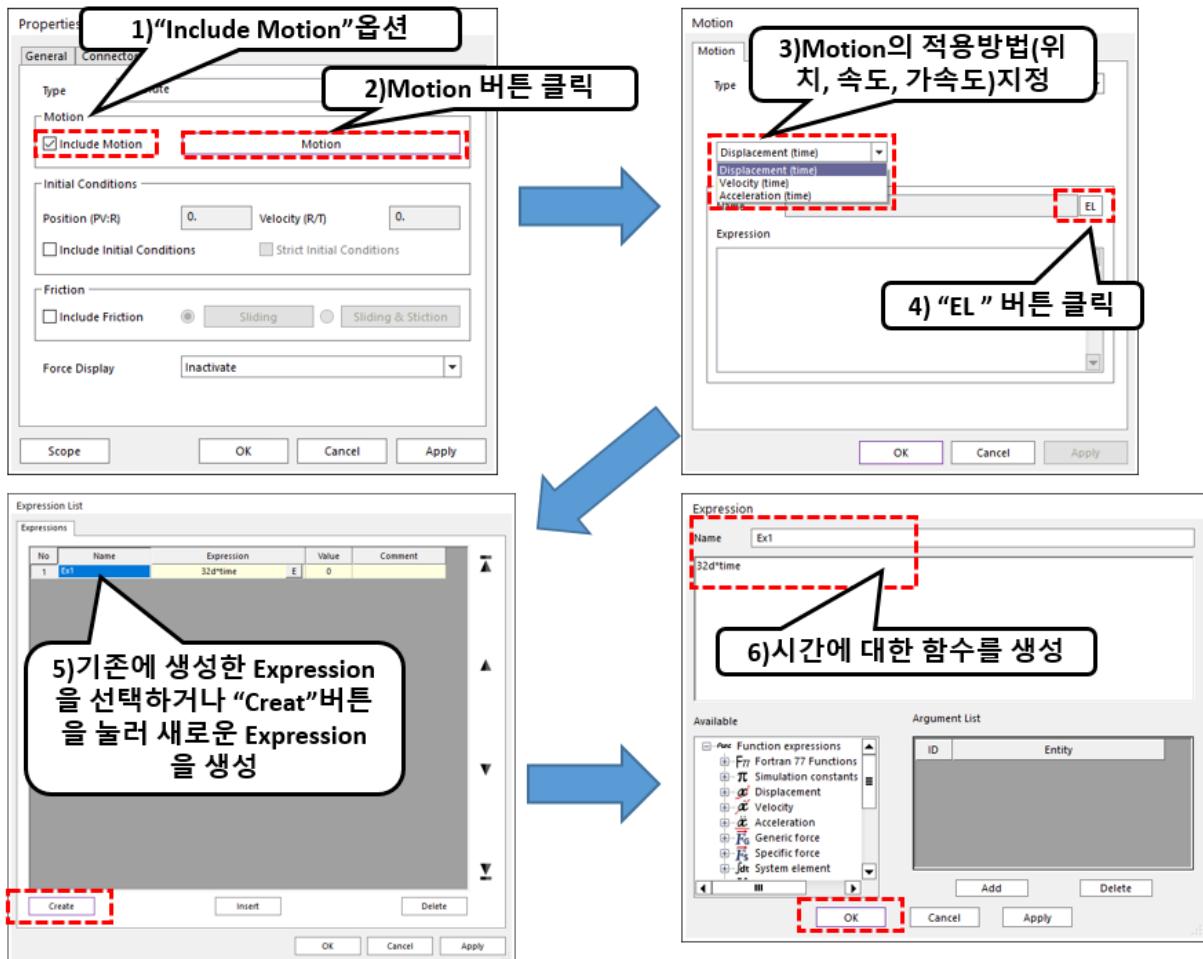


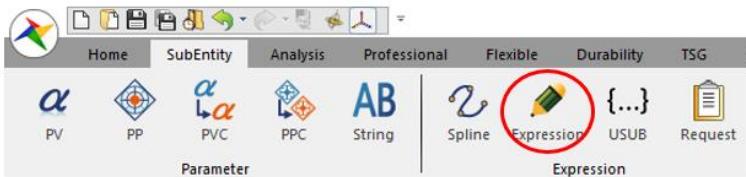
Figure 90 Joint Motion 설정 방법

3) Joint Motion과 Expression

Motion은 특정 방향의 자유도를 원하는 형태로 움직이도록 하는 기능을 수행한다. 이 때 조인트의 자유도를 수학적인 함수에 따라 움직이도록 수식을 연결하는 것이 조인트 모션이다. 모든 모션은 수학적 정의가 필요하며, 이러한 수식은 속도 적으로 볼 때 시간에 대한 연속적인 함수이어야 한다. 물리적으로 표현하면 속도가 가변적일 수 있지만 그 가속도가 극한의 값을 가지지 않아야 함을 의미한다. 조인트의 변위가 정지상태에서 0.01초동안 1m이동하게 되면, 속도는 100m/s가 되지만 가속도는 10000mm/s²이다. 더 짧은 시간 동간에 갑자기 큰 변위 또는 속도로 이동하면 이러한 비정상적 가속도는 매우 커지게 되며, Solver는 Error를 발생시킨다. 따라서 Motion으로 입력하는 수식은 시간에 대해 완만한 그래프를 가질수록 안정적으로 해석을 수행한다.

Motion에 입력하기 위한 수학적 식은 Expression에 의해 정의된다.

4) Expression



본 장의 Joint Motion에서는 생성을 위해 Joint Motion버튼을 누르면 자동적으로 Expression생성창이 Pop up된다.

Expression은 함수를 정의하는 Entity이다. Expression은 독립 Entity로서 별도의 메뉴를 통해 생성 및 수정이 가능하며 Motion에 대한 Expression을 정의한 후 선택하면 Expression의 내용대로 Joint의 움직임이 발생하는데 그 형태는 다음과 같이 정의될 수 있다.

- Expression: 0
→ 조인트의 움직임이 정지해 있음
- Expression: Time*10
→ 1초 후 10, 2초 후 20과 같이 시간에 대해 비례적으로 증가
- Expression: 30d*sin(360d*time)
→ 0.25초 후 30degree의 값을 가지고 0.75초 후 -30degree로 Sine함수 형태로 움직임

차후 Expression에 대해 다시 언급하겠지만 Expression의 내용을 수학적으로 잘 정의하면 다양한 형태의 Motion을 구현할 수 있다. Include Motion의 Check Box를 Check하고 아무런 Expression을 선택하지 않으면 자동으로 Expression의 내용을 0으로 인식한다. 4절 링크 모델의 기구학적 Solution

3. CMotion(Cartesian motion)

CMotion은 Body에 직접 Motion을 입력하는 요소로서, 조인트와 별로도 존재한다. CMotion은 한 방향에 대한 자유도를 직접 정의하는 것이므로 나머지 방향에 대해서는 자유롭게 움직일 수 있다. 이러한 입력방식은 특정 Body를 원하는 방향으로 이동시키며 메커니즘을 테스트 할 때 주로 사용된다.

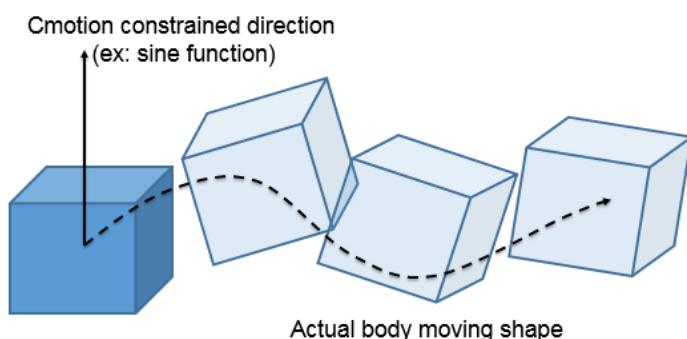


Figure 91 CMotion 작동 상태

1) CMotion 생성방법

CMotion의 생성방법은 아래의 그림과 같으며 CMotion생성 후 Property창을 열어 Motion을 입력하려는 방향과 원하는 함수를 정의 할 수 있는 Expression을 선택하면 생성이 완료된다. CMotion이 작용하는 방향에 대해 위치 속도 및 가속도의 형태를 정의할 수 있으며 Action Body는 주어진 Expression의 함수의 내용과 같이 움직이게 된다.

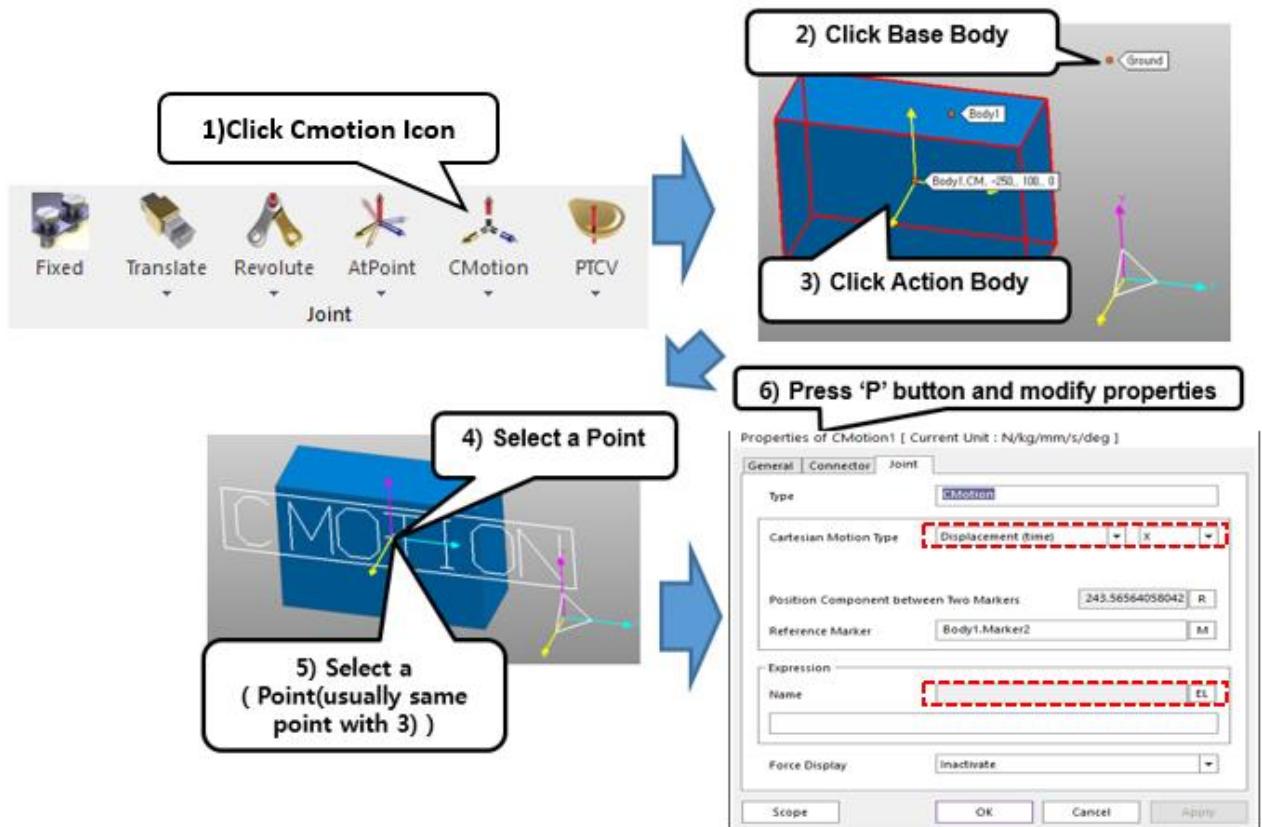


Figure 92 CMotion 생성방법

2) CMotion Expression

CMotion의 Expression은 Joint Motion의 Expression과 동일하게 작동하며, 함수의 내용은 Motion의 연속성이 보장될 수 있도록 시간에 대해 2차 연속적이어야 한다. Expression의 내용은 다른 Entity와 공유할 수 있으며 해당 값이 불연속적이지만 않다면 Action Body가 함수와 같이 움직이는 것을 확인 할 수 있다. Expression에 대해서는 다음 장에서 보다 상세하게 다룬다.

4. Parametric Point

Parametric Point는 Model 데이터에 참조좌표로서 x,y,z 좌표값을 가지는 위치 데이터 Entity이다. Parametric Point는 Model, Subsystem, Body등 각각의 데이터베이스에 독립적으로 존재하며 각 데이터베이스에 있는 요소들이 이 점을 참조하여 모델링 할 수 있다. 또한 하나의 모델안에서 상호 참조 가능하다. Body 또는 Joint와 Force를 모델링 할 때 이 Parametric Point를 이용하면, 생성되는 각 Entity의 좌표는 자동으로 Parametric Point를 참조하며, Parametric Point의 좌표를 수정하면 참조되는 모든 Entity의 좌표가 함께 변경된다.

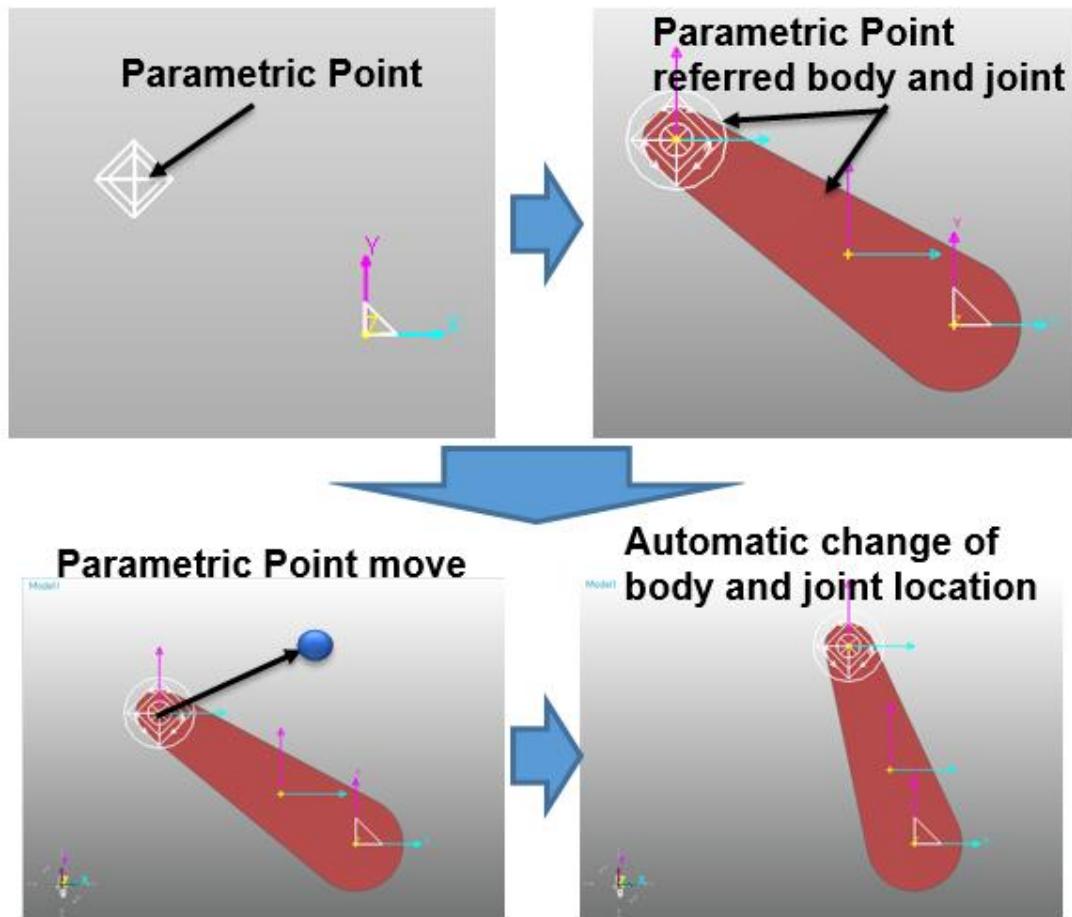


Figure 93 Parametric Point를 이용한 모델링 효과

1) Parametric Point 생성 방법

Parametric Point를 생성하는 버튼은 SubEntity Tab에 있으며 이 메뉴에서 PP라는 버튼을 이용하여 생성한다. 자세한 생성과정은 아래의 그림에 나타나 있다.

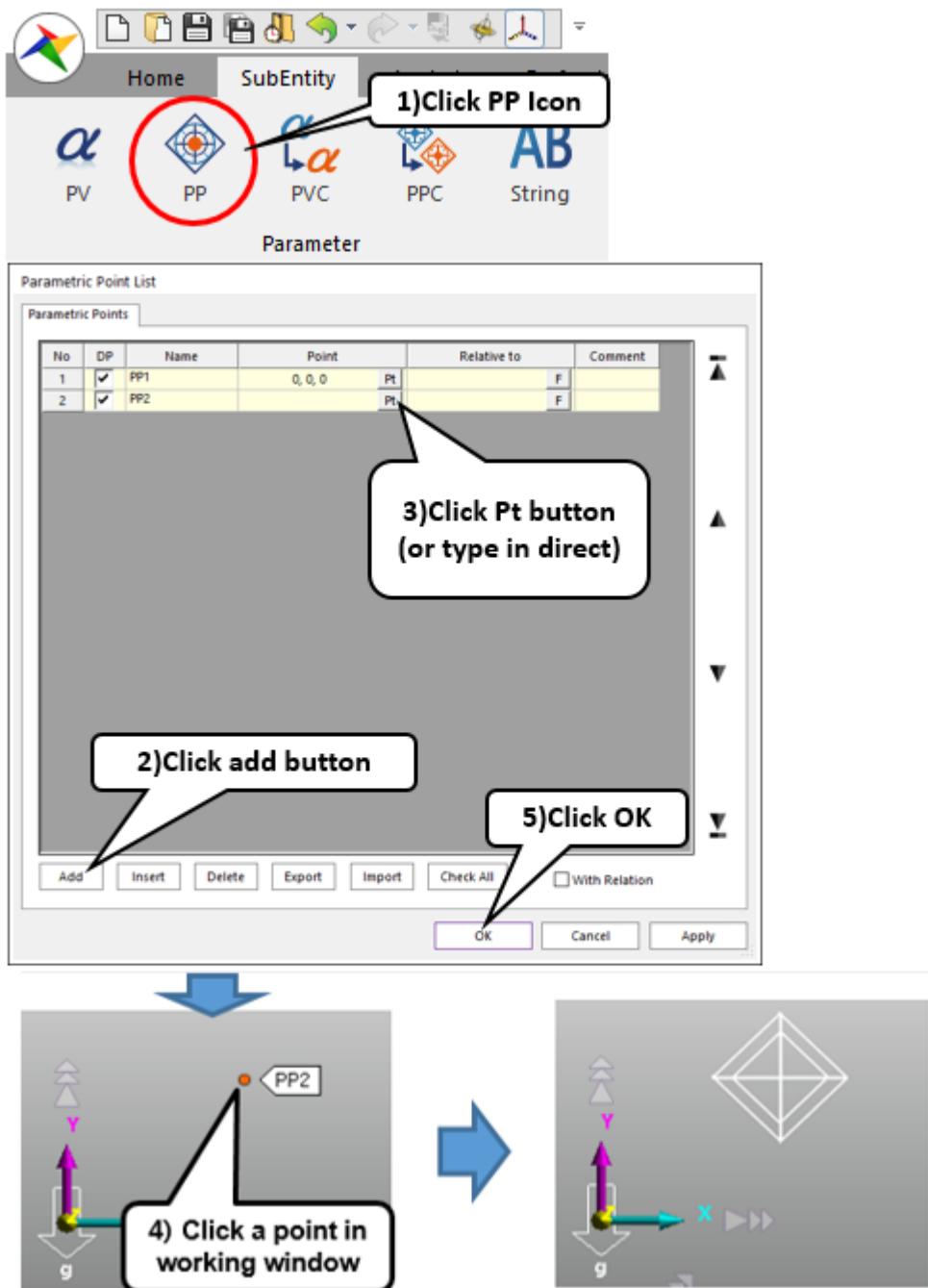


Figure 94 Parametric Point 생성방법

2) Parametric Point의 수정방법

Parametric Point는 Point의 위치를 직접 Move Tool ()을 이용하여 이동 시키거나 Parametric Point 수정 창을 열어 직접 좌표 값을 입력하여 수정할 수 있다. 첫 번째 방법의 경우 Parametric Point를 선택한 후 Move Tool의 버튼을 눌러 이동시키며 두 번

째 경우는 아래의 그림과 같이 진행한다.

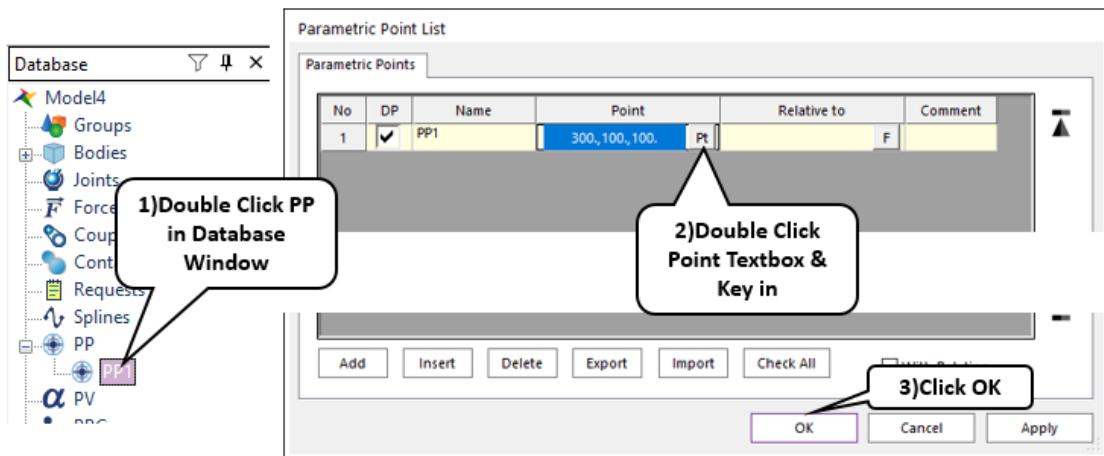
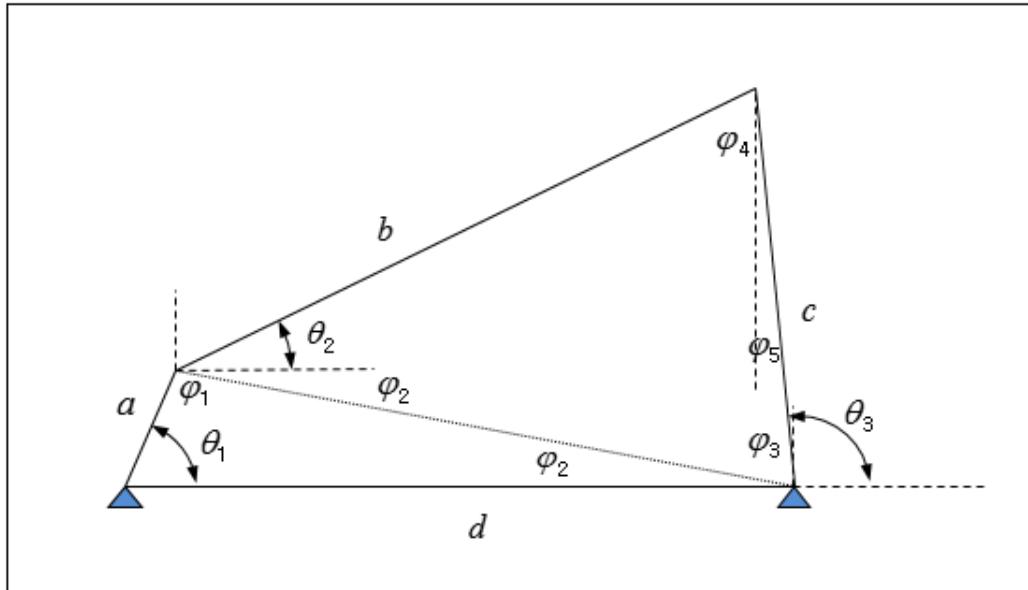


Figure 95 Parametric Point의 직접 수정방법

※ Parametric Point를 사용하는 첫 번째 이유는 Parameterize 모델링을 위함이다. 또 하나의 이유는 조인트나 힘을 모델링 하는 위치를 엄밀하게 정의하기 위함이다. Geometry상의 특정 위치에 조인트를 직접 생성할 경우 좌표 값이 소수점 6자리 이하의 불필요한 값이 남게 된다. 쉽게 말해 절단(truncation) 오류가 불가피하다. 특히 좌우 대칭형 모델일 경우 이러한 Truncation 오차가 미소한 좌우 불균형을 만들 수 있다. PP의 사용은 이러한 실수를 최소화 할 수 있다.

5. 4절 링크의 기본 공식

4절 링크는 회전운동을 비선형적 병진운동을 바꾸는 목적으로 사용된다. 이 때 구동절의 각도에 따라 각 링크의 각도를 수학적으로 계산할 수 있으며 계산된 각도를 바탕으로 각 링크의 길이를 설계자의 요구에 맞도록 조정할 수 있다.



θ_1 이 주어질 경우 θ_2 와 θ_3 를 결정하는 공식

$$\theta_2 = 2 \tan^{-1} \left[\frac{-E \pm \sqrt{E^2 - 4DF}}{2D} \right], \quad \theta_3 = 2 \tan^{-1} \left[\frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \right]$$

$$A = \cos \theta_1 - K_1 - K_2 \cos \theta_1 + K_3$$

$$B = -2 \sin \theta_1$$

$$C = K_1 - (K_2 + 1) \cos \theta_1 + K_3$$

$$D = -K_1 + (1 + K_4) \cos \theta_1 + K_5$$

$$E = -2 \sin \theta_1$$

$$F = K_1 + (-1 + K_4) \cos \theta_1 + K_5$$

$$K_1 = d/a$$

$$K_2 = d/c$$

$$K_3 = (a^2 - b^2 + c^2 + d^2)/(2ac)$$

$$K_4 = d/b$$

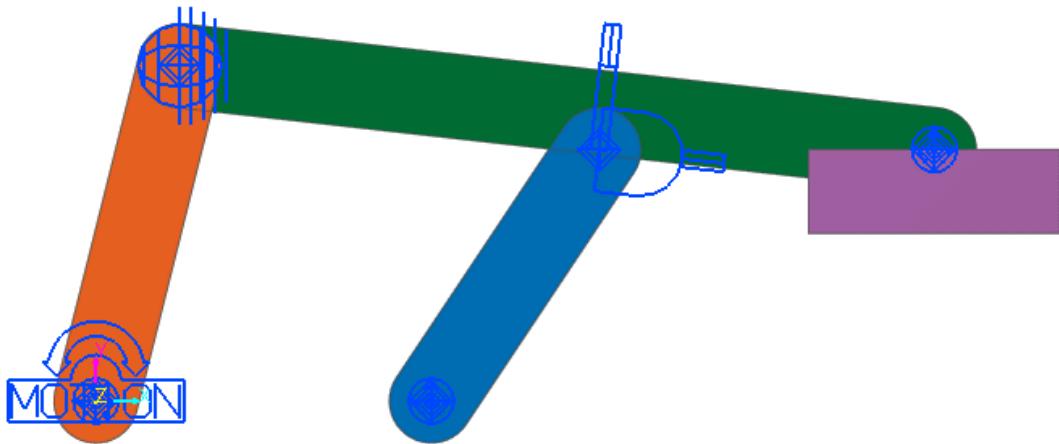
$$K_5 = (-a^2 - b^2 + c^2 - d^2)/(2ab)$$

Workshop 6 Gripper (1)

내용: 4절링크 메커니즘을 이용한 Gripper를 모델링하고 구동축에 모션을 입력하여 1cycle작동시켜 Motion대로 작동하는 Gripper 모델링을 확인한다.

본 워크샵을 통해 아래의 관련기능을 익힐 수 있다

- Parametric Point를 이용한 모델링 방법
- Joint 입력 및 수정 방법
- Joint Motion입력방법



수행시간	40분
난이도 Level	1

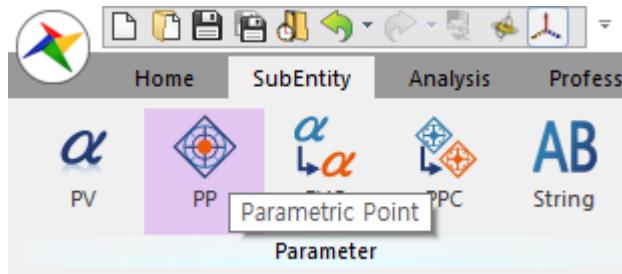
Workshop 수행을 위해 필요한 사항

- RecurDyn Professional

STEP 1 모델링을 위한 Point 생성: Parametric Point는 Modeling을 위해 Working Space에 생성하는 참조 점으로서, 이 점을 기준으로 Body 또는 Joint, Force와 같은 요소를 생성하면 보다 쉽게 모델링 할 수 있다.

1. Recur Dyn을 실행 시키고 New Model을 생성한다.

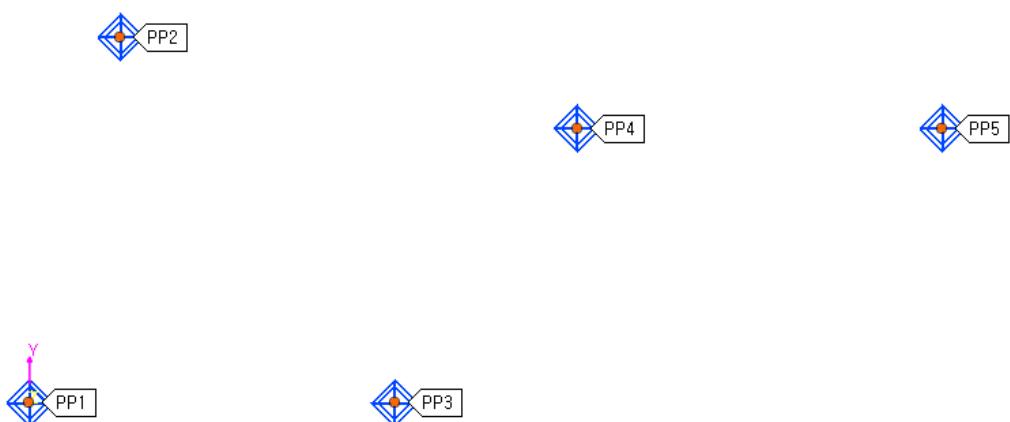
2. SubEntity Tab 메뉴에 PP(parametric point)버튼을 눌러 Edit창을 띄운다



3. ,Add버튼을 눌러 PP1을 생성시키고 Point에 0,0,0을 입력한다. 이후 계속하여 add버튼과 point입력을 통해 총 5개의 Parametric Point를 생성한다

Parametric Point List						
Parametric Points						
No	DP	Name	Point	Relative to	Comment	
1	<input checked="" type="checkbox"/>	PP1	0,0,0	Pt	F	
2	<input checked="" type="checkbox"/>	PP2	10,40,0	Pt	F	
3	<input checked="" type="checkbox"/>	PP3	40,0,0	Pt	F	
4	<input checked="" type="checkbox"/>	PP4	60,30,0	Pt	F	
5	<input checked="" type="checkbox"/>	PP5	100,30,0	Pt	F	

4. PP입력이 완료되면 OK버튼을 눌러 화면에 생성된 PP를 확인한다.



STEP 2 Link Body생성: 화면에 생성된 PP를 이용하여 Link Geometry를 가진 Body를 생성한다

1. Professional Tab의 Body Group에서 Link 버튼  을 누른다

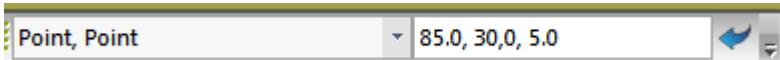
2. Working Window에서 PP1과 PP2를 순서대로 Click하여 Link Geometry를 생성한다

3. 두 번째 Link Geometry는 PP3과 PP4를 순서대로 Click한다

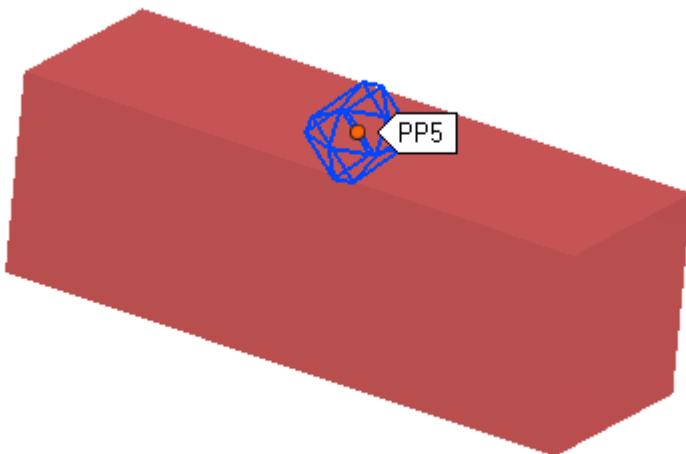
4. 세 번째 Link Geometry는 PP2와 PP5를 순서대로 Click한다

5. Professional Tab의 Body Group에서 Box 버튼  을 누른다

6. Create option menu의 Text Box에 85.0, 30.0, 5.0을 입력한 후 Enter버튼을 누르고



다시 115.0, 20.0, -5.0을 입력한 후 Enter버튼을 눌러 Box Geometry를 완성한다



7. Working Window에서 Body1을 double click하여 Body Edit 모드로 진입

8. Link1을 선택하고 'p'버튼을 눌러 Property 창을 연다

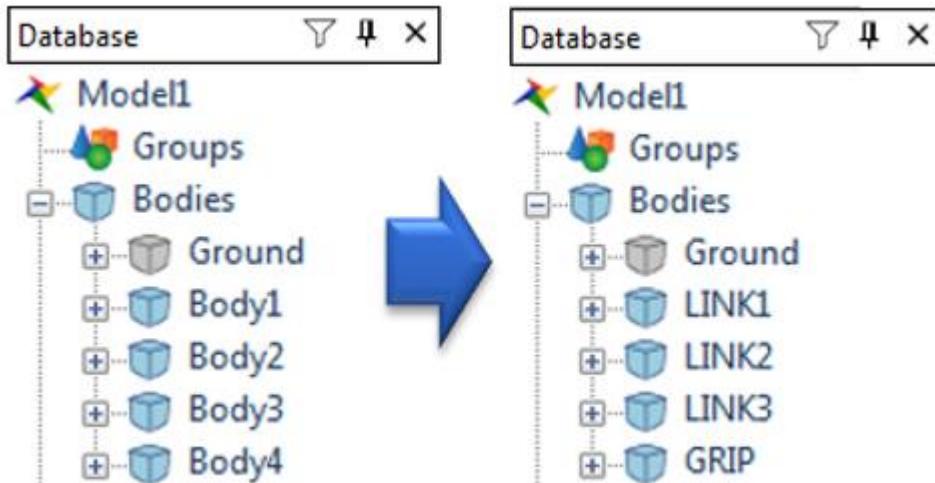
9. Link의 Property중 First Radius와 Second Radius 그리고 Depth의 값을 5.0으로 입력

First Radius	<input type="text" value="5"/>	<input type="button" value="Pv"/>
Second Radius	<input type="text" value="5"/>	<input type="button" value="Pv"/>
Depth	<input type="text" value="5"/>	<input type="button" value="Pv"/>

10. Ok버튼을 누르고 Body Edit Mode를 빠져 나온다.

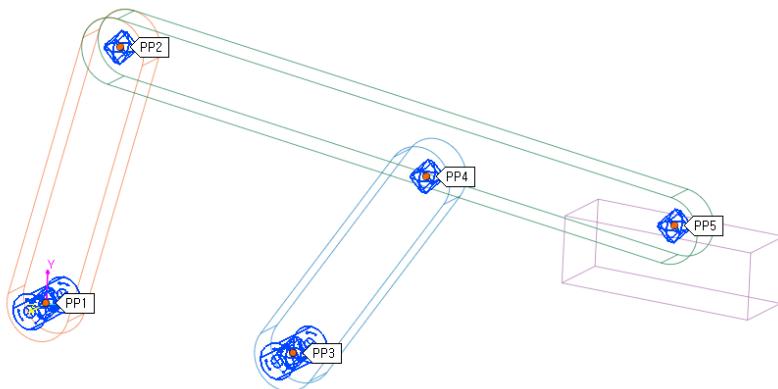
11. Body2와 Body3에 대해서도 동일하게 First Radius와 Second Radius 그리고 Depth의 값을 5.0으로 입력

12. Body의 이름을 그림과 같이 변경해 준다.(Modeling에서 Body나 Joint의 이름을 부여하는 과정은 매우 중요하다. 가급적 사용자가 이해 할 수 있는 단어를 사용하여 혼돈되지 않도록 해야 한다.

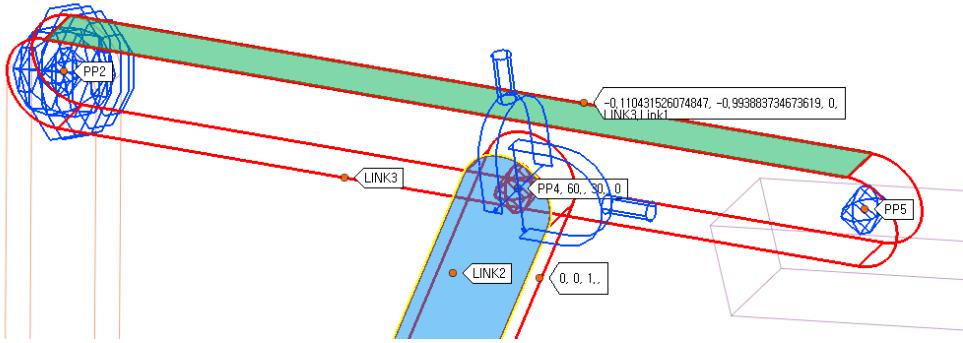


STEP 3 Joint 생성

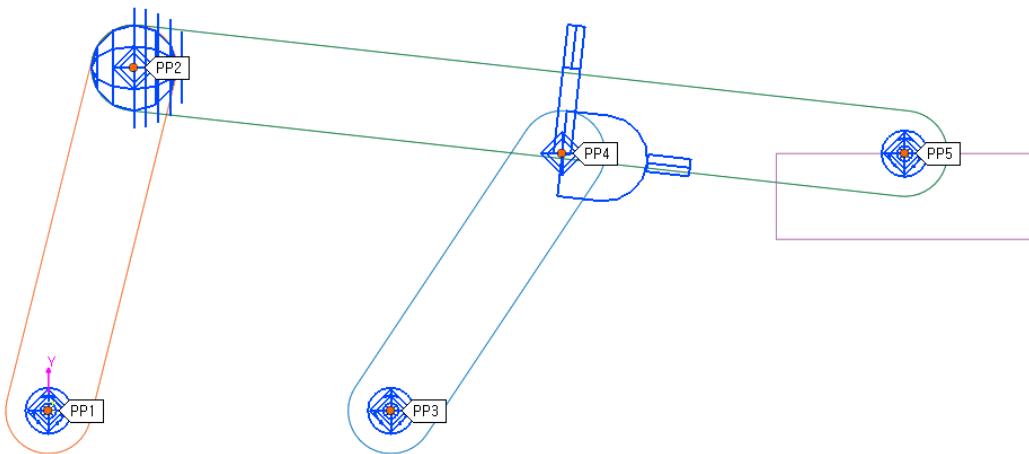
1. Professional Tab의 Joint Group에 있는 Revolute버튼을 누르고 Base Body로 Ground를 Click하고 Action Body로 LINK1을 Click 후 마지막으로 PP1을 Click하여 Revolute Joint를 생성
2. 동일한 과정을 통해 Base Body로 Ground를 Click하고 Action Body로 LINK2를 Click 후 마지막으로 PP3을 Click하여 Revolute Joint를 생성



3. 동일한 과정을 통해 Base Body로 LINK3를 Click하고 Action Body로 GRIP을 Click 후 마지막으로 PP5를 Click하여 Revolute Joint를 생성
4. Professional Tab의 Joint Group에 있는 Spherical버튼을 누르고 Base Body로 LINK1을 Click하고 Action Body로 LINK3을 Click 후 마지막으로 PP2를 Click하여 Spherical Joint를 생성
5. Professional Tab의 Joint Group에 있는 Universal버튼을 누르고 Base Body로 LINK2를 Click하고 Action Body로 LINK3을 Click한 다음 PP4를 선택하여 위치를 입력하고, 회전 축이 되는 첫 번째 벡터는 그림과 같이 LINK3의 윗면을, 두 번째 벡터는 LINK2의 옆면을 선택하여 그림과 같이 Universal Joint가 생성되도록 한다.



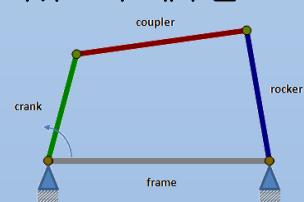
6. 완성된 모델에 대해 1회 Simulation을 수행하여 연결상태가 올바로 표현되고 있는지 확인한다.



* 4절링크의 조인트모델링과 과구속

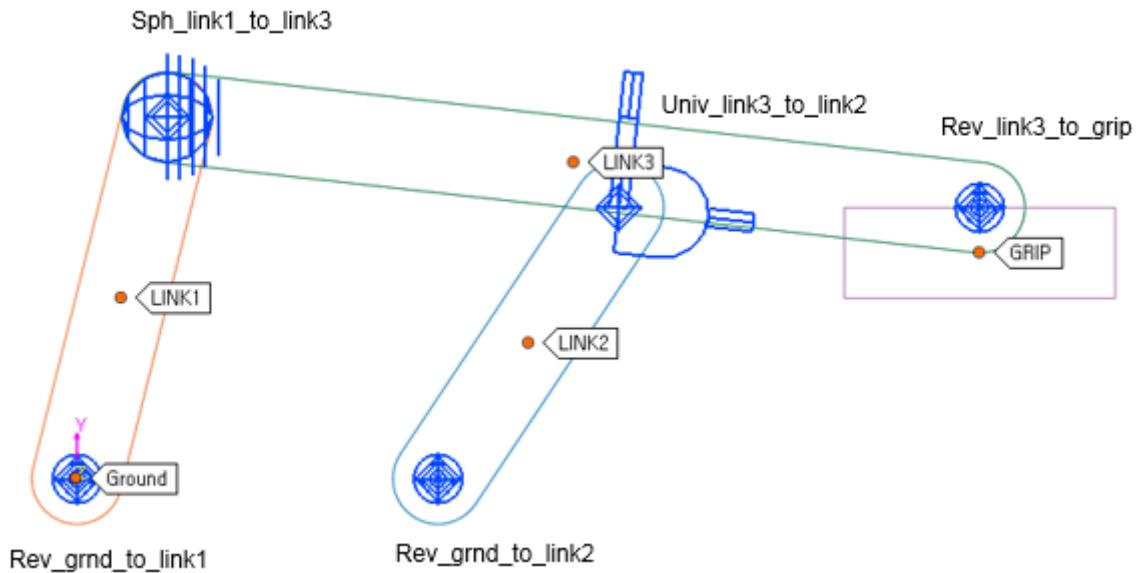
실제로 4절링크 모델을 제작한다면 각 조인트는 모두 Revolute Joint로 구성할 것이다. 물론 다물체동역학 모델에서도 동일하게 모델링 할 수 있다. 그러나 모든 조인트를 Revolute Joint로 모델링하면 구속식이 자유도의 개수를 초과 하는 과구속상태가 된다.

- DOF: Body개수 3 (ground제외) \times 6 = 18
- Constraint Eqn. : Revolute개수 $4 \times 5 = 20$
- SYSTEM DOF: DOF – Constraint Eqn. = -2



이 상황에서 Solver는 2개의 자유도를 수학적 가중치에 따라 제거하게 되며, 이는 사용자에게 예측할 수 없는 위치에서 발생한다. 따라서 가급적 과구속이 발생하지 않는 모델링이 필요하다. 가장 쉬운 방법은 Joint의 일부를 Force모델로 대체하는 방법이며 보다 엄밀한 방법은 본 절에서 수행한 모델링과 같이 메커니즘을 유지하는데 불필요한 구속식을 갖지 않도록 조인트를 구성하는 방법이다. 본 모델의 Constraint Eqn은 17이며 총 1자유도를 가진다

7. 완성된 조인트를 구분하기 쉽도록 아래의 그림과 같이 각각의 이름을 설정



STEP 4 조인트의 회전을 입력 할 Expression생성

1. SubEntity Tab의 Expressions버튼을 누른다

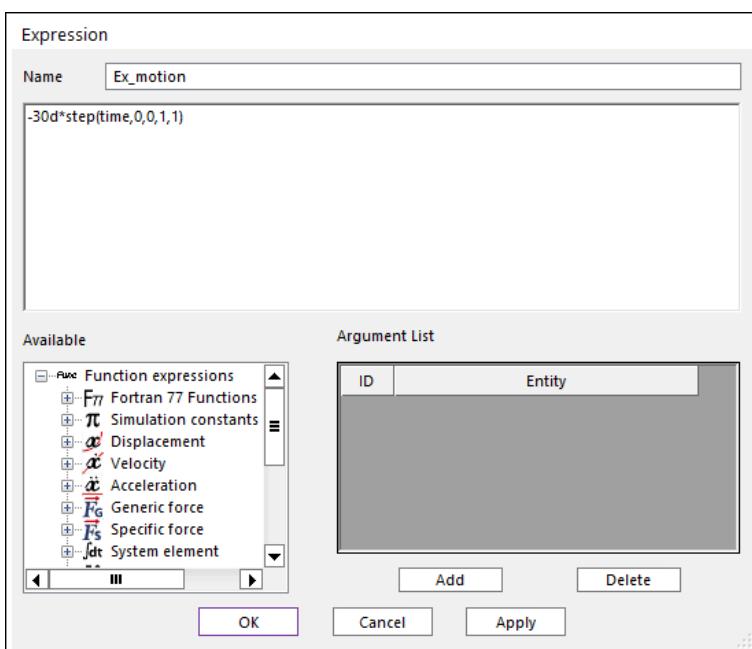


2. Expression수정 창이 뜨면 Create버튼을 누른다

3. Expression Editor가 뜨면 내용을 Name과 Text창에 아래와 같이 입력한다.

Name: Ex_motion

Contents: $-30d\cdot\text{step}(\text{time}, 0.0, 0.0, 1.0, 1.0)$



4. Ok버튼을 닫고 나온다.

5. Database Window에 Ex_motion이라는 Expression이 등록된 상태를 확인한다.

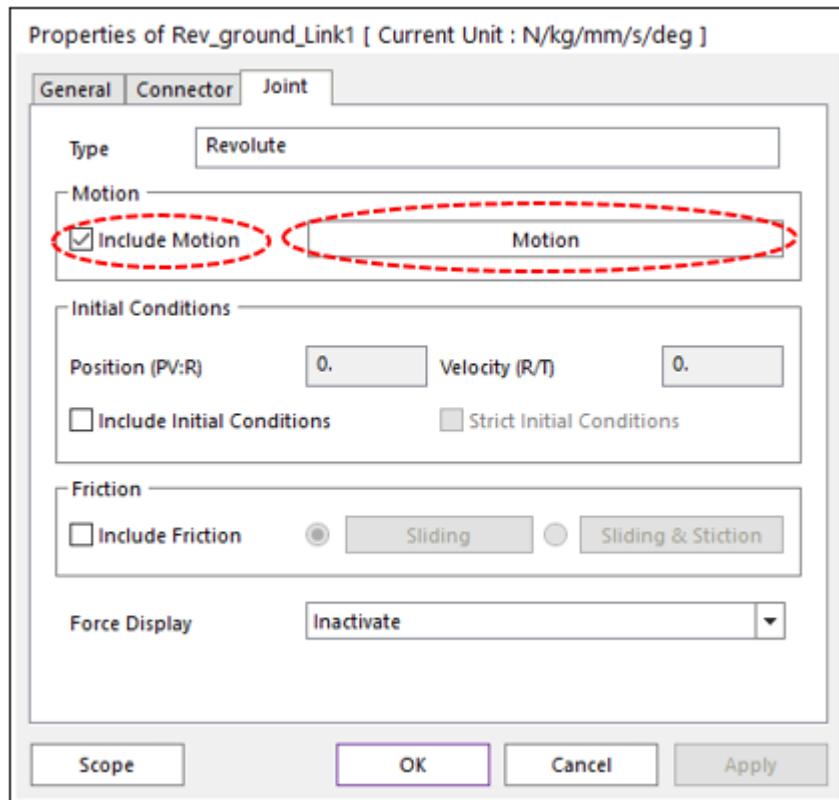


STEP 5 생성한 각Motion 입력: Joint의 Motion을 입력하여 작동 메커니즘을 완성하고 해석

1. Rev_grad_to_link1 조인트를 선택한 후 'p'버튼을 누른다.

2. Joint Property창에서 Joint Tab의 내용 중 Include Motion Check On

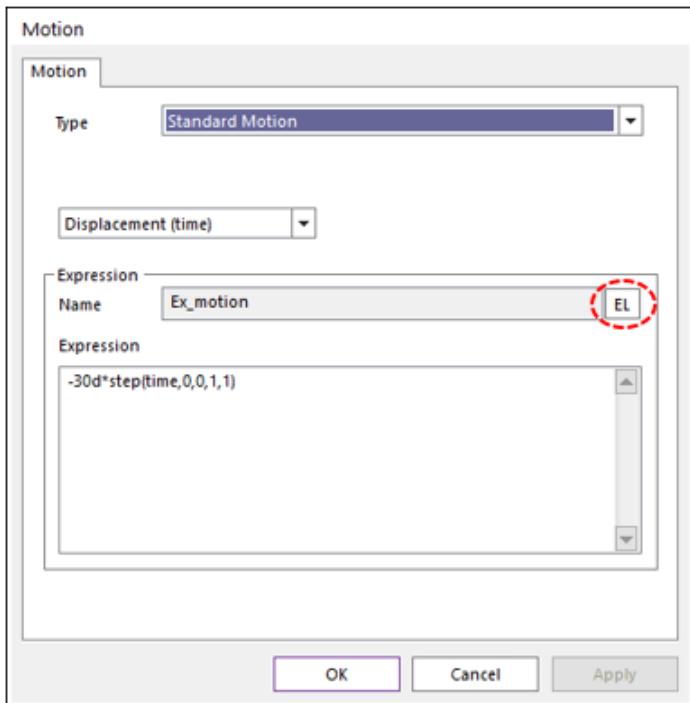
3. Motion 버튼을 누른다



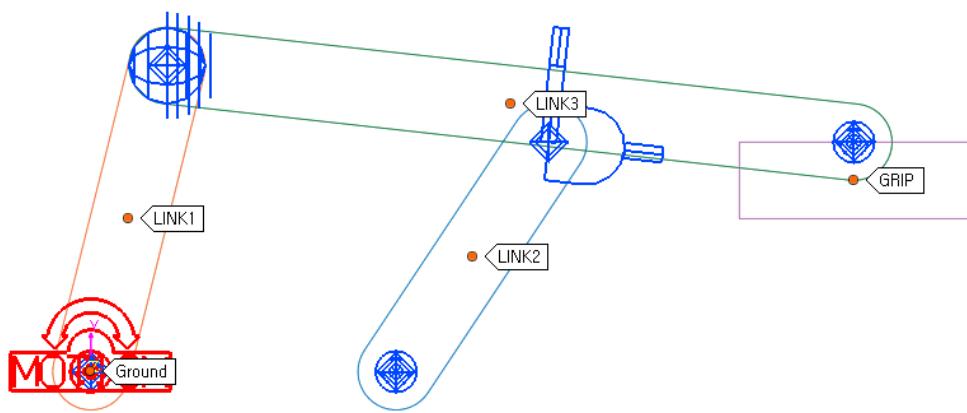
4. Motion창에서 EL버튼을 누르면 Expression 수정 창이 뜬다

5. Expression 수정 창에서 이미 생성해 두었던 Ex_Motion을 선택한다. 이 과정에서 미리 만들어 둔 Expression이 없을 경우 이 창에서 직접 Create버튼을 눌러 생성하여도 무방하다.

6. 생성 후 Ok버튼을 눌러 Expression 수정 창을 빠져 나오고, 다시 Motion창의 Ok버튼을 눌러 Motion창을 빠져나온다. 그리고 마지막으로 Joint Property창의 Ok버튼을 눌러 Motion의 적용을 완료한다.

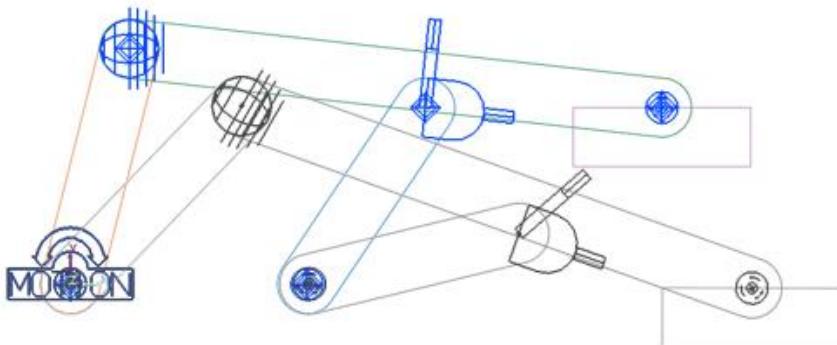


Expressions				
No	Name	Expression	Value	Comment
1	Ex_motion	-30d*step(time,0,0,1,1)	E -0	



7. Analysis Tab에서 Dyn/Kin버튼을 눌러 1초동안 100 Step으로 해석을 수행해 본다.

8. Animation Control 창에서 동영상을 Play해 본다.



STEP 6 Postprocessor에서 Motion의 입력에 따른 작동 변위 속도 및 가속도를 그래프로 그려보고 Motion0이 작동하기 위한 Reaction Torque를 그래프로 그려본다.

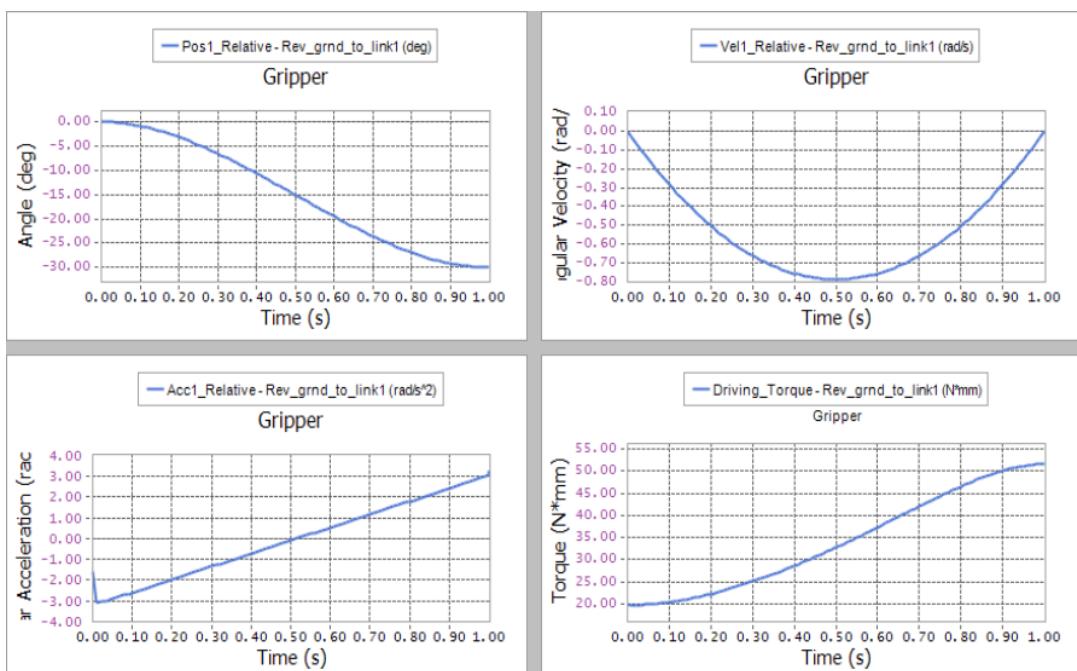
1. Plot_Result 버튼 을 눌러 Postprocessor로 진입

2. Plot database에서 Joint Motion0이 입력되어 있는 Entity를 확장한다.
Gripper/Joints/Rev_grnd_to_link1/

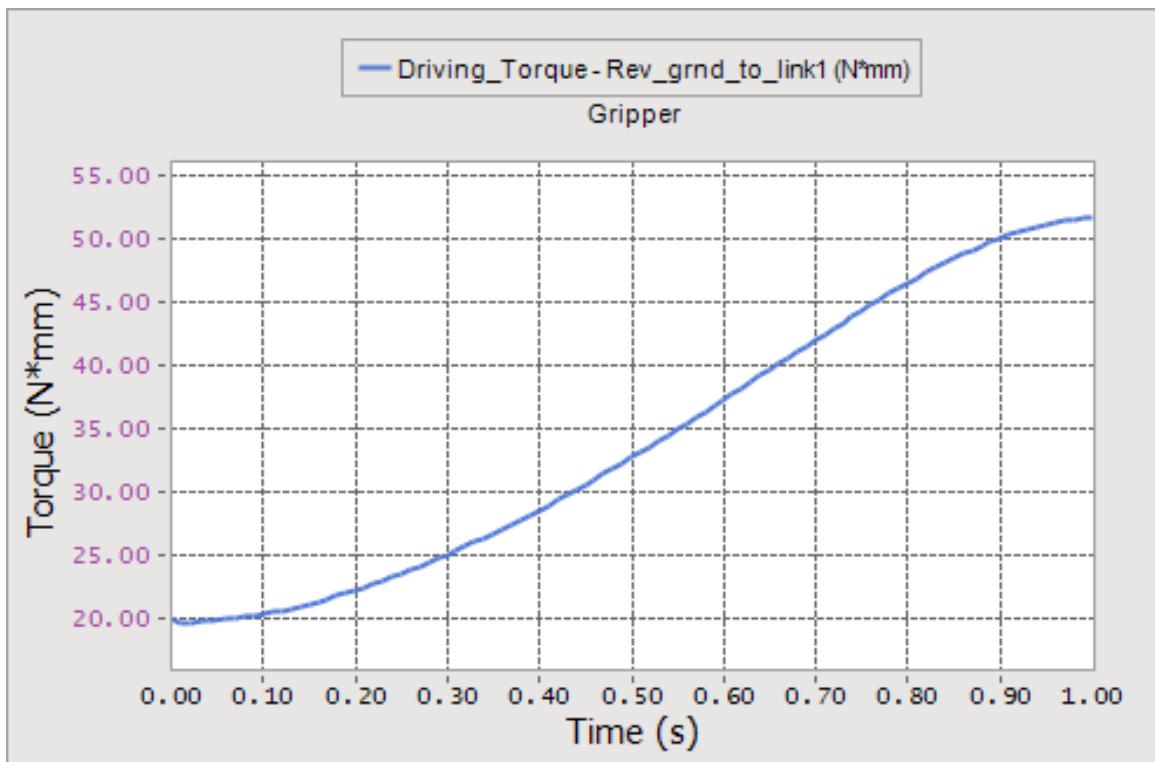
3. Window 버튼을 눌러 를 선택(4개의 Window로 분할)

4. Pos1_Relative, Vel1_Relative, Acc1_Relative, Driving Torque를 각각 다른 Page에 더블클릭하여 그려본다

각각의 데이터에 대한 의미를 이해하고 분석해 본다.



Pos1_relative는 Motion에 입력한 Expression의 함수가 작동한 함수를 그대로 나타내며, Vel1_relative와 Acc1_Relative는 각각 1차미분 및 2차미분 결과에 해당한다.



마지막으로 가장 Torque는 중요한 의미를 지니는 데이터로서 Motion이 작동하기 위해 필요한 토크를 의미하며 Motion에서 측정되는 토크 또는 힘의 값은 모터 또는 유압피스톤이 발생시켜야 하는 작동력에 해당한다. 따라서 이러한 해석결과를 참조하여 모터의 용량을 결정하거나 유압 피스톤의 면적 또는 압력을 결정 할 수 있다.

※ 본 장에서 사용한 Gripper모델은 다음장의 Primitive Joint 및 Subsystem 모델링에서 재활용됩니다.

Chapter 7. Primitive Joint and Subsystem

Lecture:

Primitive Joint에 대해 이해하고 활용방법에 대해 알아본다. RecurDyn Subsystem모델링 방법에 대해 알아본다.

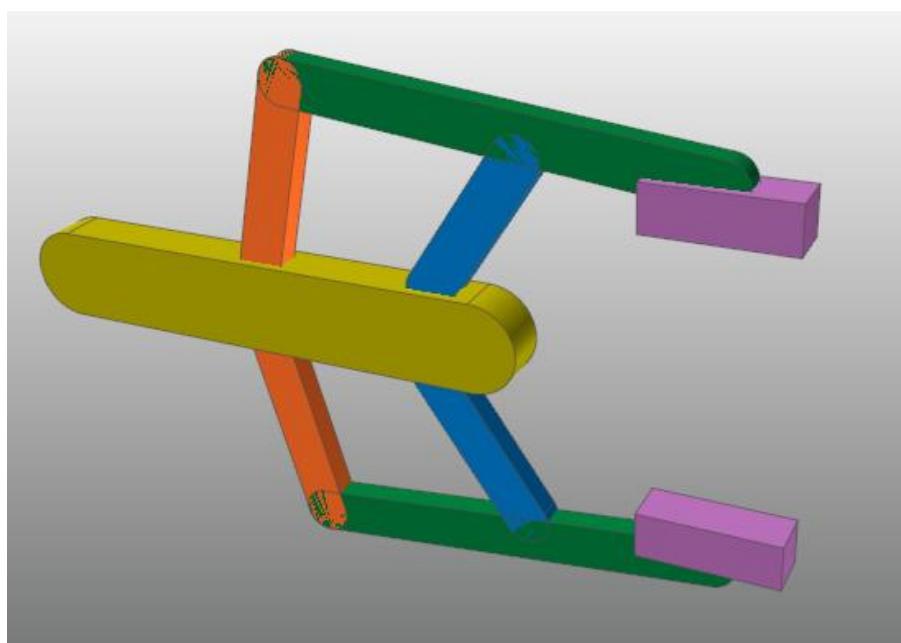
Workshop

수동 클러치 모델을 구성하여 작동 특성을 관찰하며, 회전 스프링으로 변형한 단순화한 모델을 구성하고 두 모델의 차이점 및 장단점에 대해 논의



소요 시간

강의명	시간(분)
Primitive Joint의 종류와 활용법 Subsystem모델의 의미와 사용법	30 분
Workshop	30 분
총합	60 분



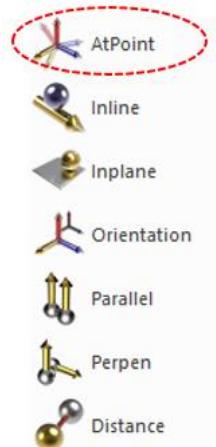
1. Primitive Joint

Primitive Joint는 실제 물리적 시스템으로 존재하는 조인트가 아니라 해석적 필요에 의해 이론적으로 자유도를 구속한 조인트를 의미한다. 이 조인트는 작게는 하나의 자유도에서 3개의 자유도를 논리적으로 구속한다. Primitive Joint를 활용하면 다양한 테스트환경을 보다 쉽게 구현할 수 있다.

1) Primitive Joint의 종류 및 활용법

(1) At Point

At point는 Spherical 조인트와 동일한 형태의 자유도를 구속한다. 다만 차이점이 있다면 수학적으로 Relative Coordinate를 사용하지 않고 Absolute Coordinate를 사용한다. 따라서 이 조인트를 사용하면 조인트 연결 Chain이 분할되는 효과가 있다. 두 조인트의 차이점을 일반적인 모델에서는 확인할 수 없다. 주로 Chain형태의 조인트 모델에서 연결상태를 분할하기 위해 사용한다.



(2) Inline

Inline 조인트는 가장 많이 활용되는 Primitive 조인트로서 주로 Revolute조인트와 동일한 메커니즘을 구성하기 위해 Spherical조인트와 함께 사용된다. 작동 자유도는 Action Body가 Base Marker의 z 축 방향으로 Action Marker 위치에서 병진이동가능하며 3방향의 회전이 가능하다. 작동 방식과 활용모델의 형태를 아래의 그림에 나타내었다.

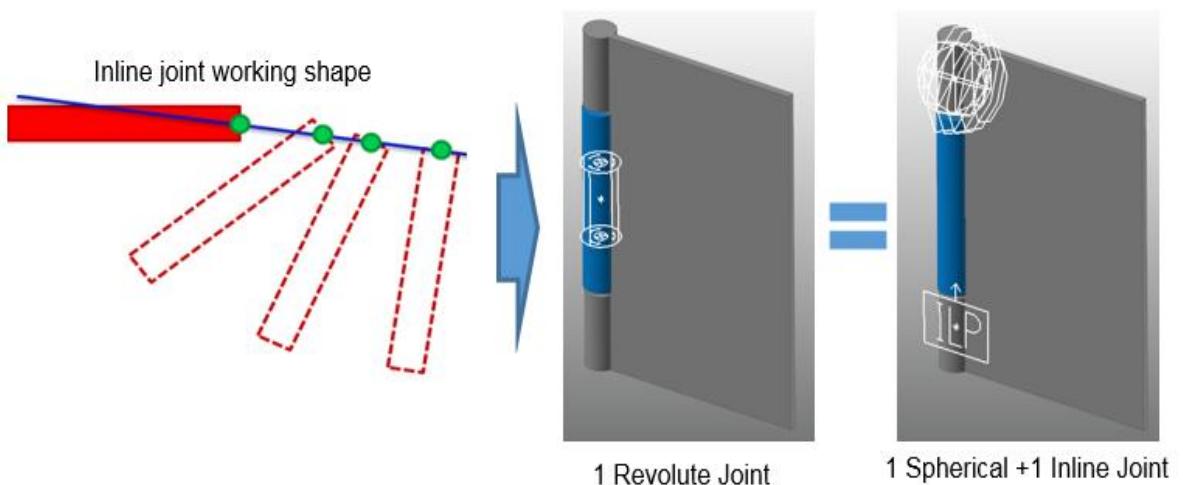
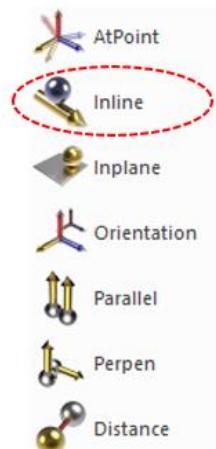


Figure 96 Inline Joint 작동자유도 및 활용모델

(3) Inplane

Inplane조인트는 Action Body가 Base Marker의 xy평면을 움직일 수 있도록 구속하는 조인트이다. z방향으로만 움직일 수 없다. 쉽게 말해 볼링공을 상상하면 된다. 이 조인트는 Slit에 끼워진 메커니즘을 모델링 할 때 사용 할 수 있으며, Planer 조인트와 유사하게 사용된다.

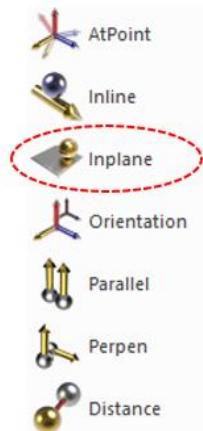


Figure 97 Plane Joint 작동자유도

(4) Orientation

Orientation 조인트는 Action Body가 병진운동은 가능하지만 회전운동이 발생하지 않도록 구속하는 조인트이다. 이 조인트는 주로 1/4차량 해석 시 Chassis를 Ground와 구속시킬 때 사용한다. 바퀴가 하나인 차량모델은 3차원공간에서 쉽게 쓰려져 버리지만 Orientation Joint 가 있는 경우 쓰려지지 않는다.

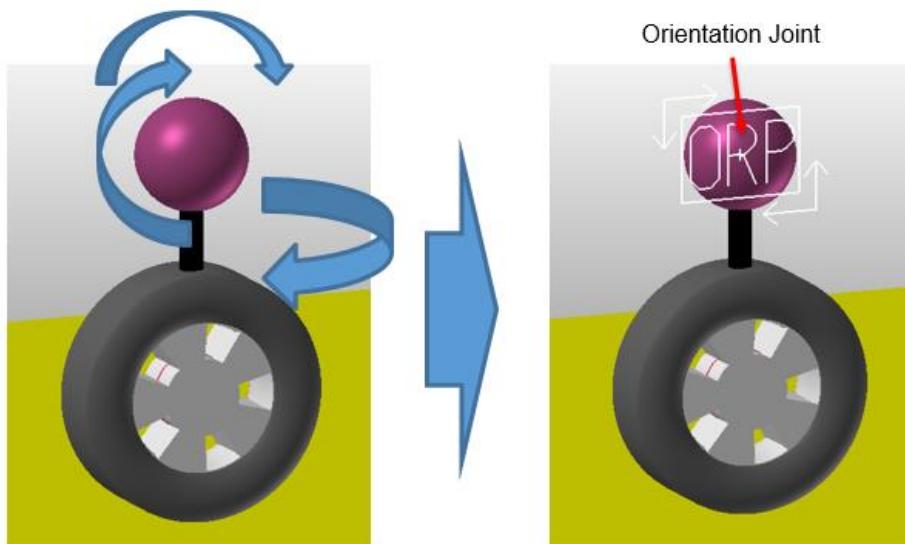
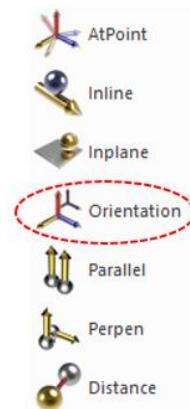


Figure 98 Orientation Joint의 활용

(5) Parallel

Parallel Joint는 Action Body의 Marker와 Base Body Marker가 z 방향으로 서로 평행한 상태에서 병진이동이 가능하며 z축에 대해서도 회전 가능하다. 이 조인트는 다른 조인트와 함께 사용하여 특정한 방향을 추종하도록 모델링 할 때 사용된다.

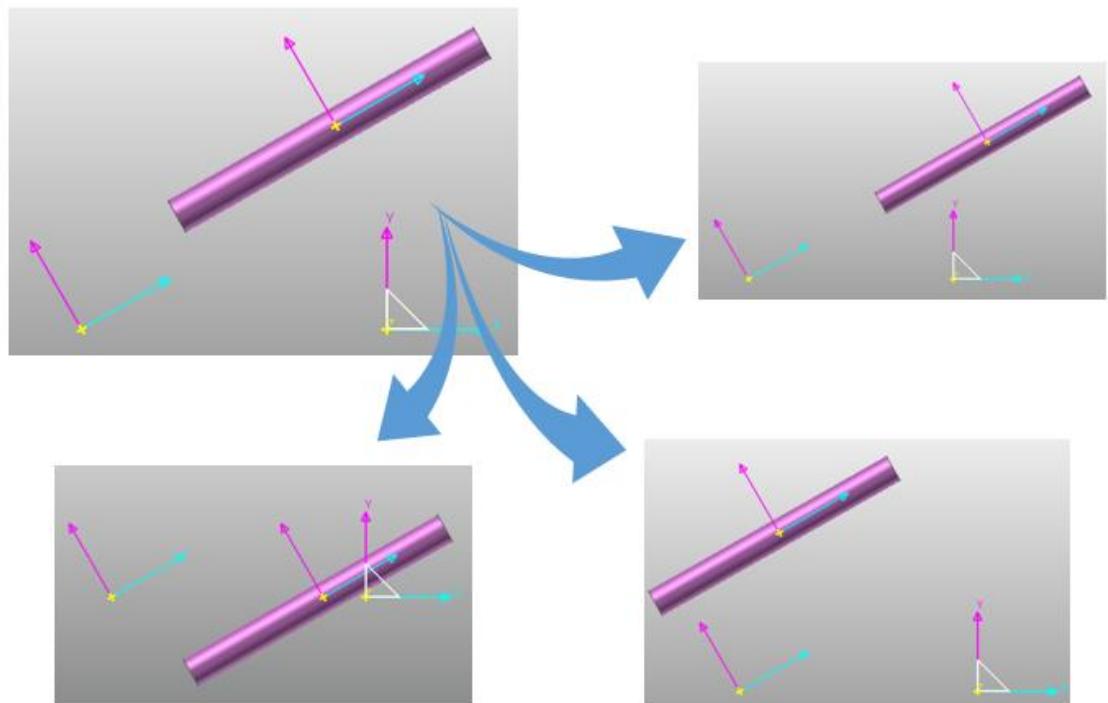
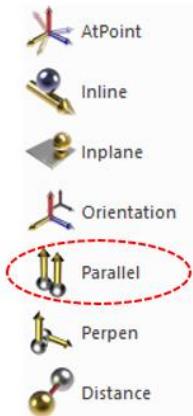


Figure 99 Parallel Joint의 작동자유도

(6) Perpendicular

Perpendicular Joint는 Action Marker와 Base Marker 각각의 Z축이 서로 수직인 조건을 유지해 준다. 이러한 기능은 굴삭기의 버켓이나 로봇이 잡고 있는 Hand Grip이 컵을 항상 수직으로 향하도록 모델링 할 때 유용하게 사용할 수 있다. 생성할 때 Joint의 두 Marker가 반드시 한 지점에 위치할 필요는 없으며 최초 모델상태에서 두 Marker는 서로 수직인 상태이어야 한다.



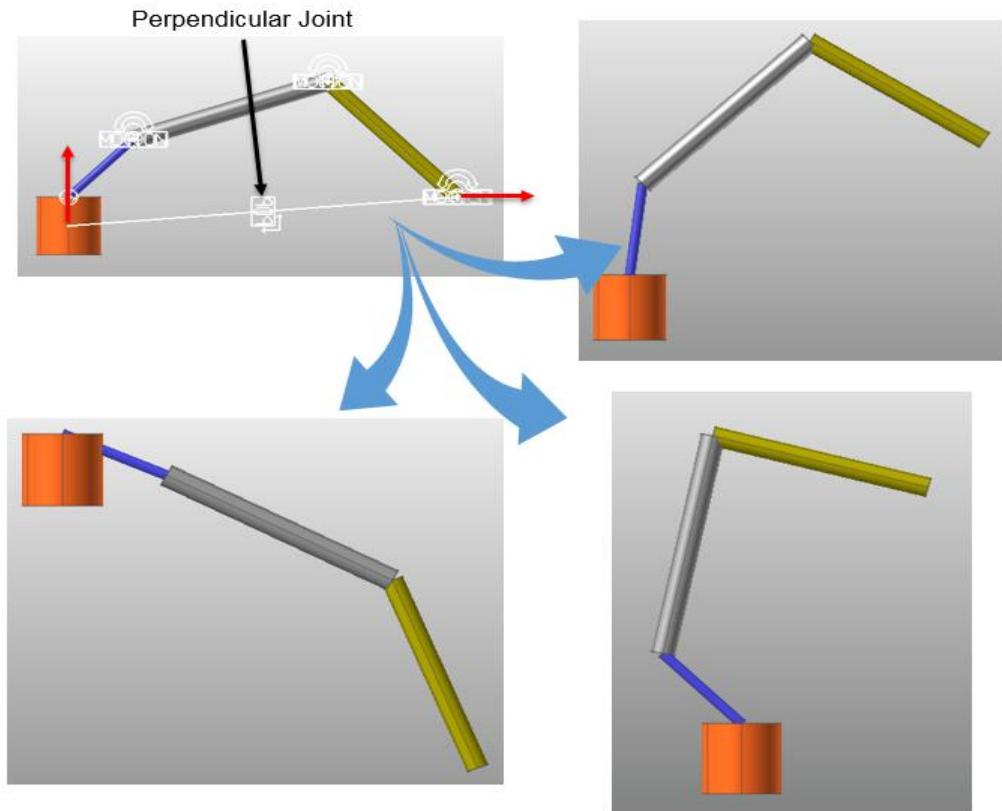


Figure 100 Perpendicular Joint의 활용

(7) Distance

Distance 조인트는 서로 떨어져 있는 두 Marker 사이의 거리가 일정하게 유지되도록 구속하는 조인트이다. 쉽게 이야기하면, 떨어져 있는 두 Body를 하나의 Link Body로 연결하고 양 끝을 Spherical조인트로 연결한 것과 같다. Distance조인트를 적용할 경우 Link Body는 필요 없으며 양 끝은 Spherical조인트처럼 3 방향으로 회전 가능하다.

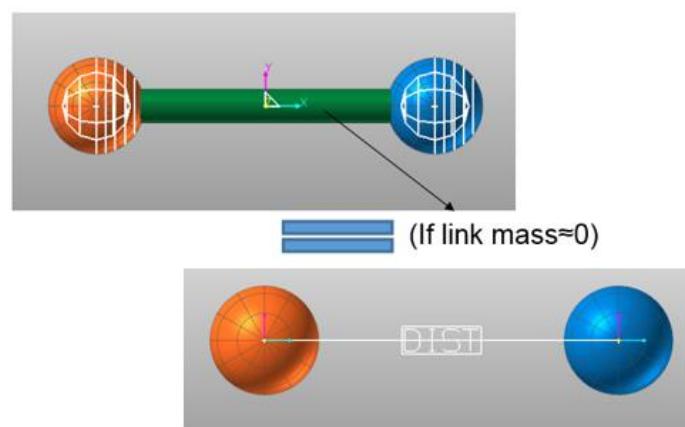
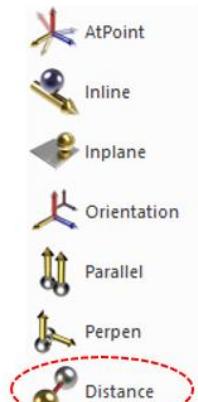


Figure 101 Distance Joint의 작동자유도

(8) Cartesian Motion(CMotion)

CMotion은 Body와 Body사이의 병진 또는 회전에 대한 하나의 자유도를 구속하여 Expression에 따라 작동하도록 만들 수 있다. CMotion은 매우 다양한 용도로 사용되며 특정 Body를 시간에 대한 함수로 움직이고자 할 때 주로 사용된다. 이에 대한 설명은 이미 Joint Motion에서 설명하였으므로 더 이상의 설명은 생략한다.



2) Primitive Joint의 생성 및 수정방법

Primitive Joint의 생성방법은 일반 Joint와 거의 동일하지만 조인트의 특성상 필요한 Marker의 상태가 약간 특수하므로 조인트에 대한 생성시 주의점을 알아 둘 필요가 있다. Primitive Joint의 경우 생성과정에서 Joint의 위치와 Vector를 결정하기보다는 생성 후 Property창을 열어 수정하는 형태의 모델링이 보다 효과적이다.

(1) At Point

Spherical Joint와 동일하게 하며 Action 및 Base Marker의 위치와 자세는 동일하게 입력한다.

작업순서: Base Body → Action Body → Point

(2) Inline

Inline joint를 생성할 때는 이동 방향이 되는 Vector의 선택이 중요하다. Action과 Base Marker의 초기 위치가 다른 것은 문제가 되지 않지만 반드시 Action Maker는 Base Marker의 Z축 선상에 존재하여야 한다. 가급적 같은 위치에 Marker를 생성하는 것이 바람직하다.

작업순서: Base Body → Action Body → Point → Direction Vector

(3) Inplane

Inplane조인트는 Action Body가 이동할 평면에 대해 수직인 Vector를 설정하는 것이 중요하다. Action과 Base Marker의 위치를 가급적 동일하게 설정하고 마지막의 Vector 설정이 이동평면의 수직인 벡터이다.

작업순서: Base Body → Action Body → Point → Direction Vector

(4) Orientation

Orientation 조인트는 Spherical조인트와 마찬가지로 Body와 조인트의 위치만 설정하면 생성된다.

작업순서: Base Body → Action Body → Point

(5) Parallel

Parallel조인트는 두 Body와 두 Point를 요구한다. 이는 떨어져 있는 두 위치에 대해 설정하기 쉽도록 구성한 것이다. 마지막 방향Vector는 서로 수평으로 유지할 방향을 결정하는 것으로서 Marker가 아닌 어떠한 Vector를 지정하더라도 무방하다. 생성 후 두 Marker의 Z방향이 마지막에 지정한 Vector방향으로 자세가 결정된다.

작업순서: Base Body → Action Body → Base Marker Point → Action Marker Point → Direction Vector

(6) Perpendicular

두 Body와 하나의 위치를 정의하고 두 개의 방향Vector를 결정해야 한다. Default 옵션으로 하나의 Point와 두 개의 Vector를 결정하도록 되어 있지만 굳이 하나의 Point만 사용할 필요가 없다. 일반적으로 이 조인트는 개념적으로 두 Point를 설정하는 것이 더 명확해 보인다. 마지막에 입력하는 두 Vector는 서로 수직이어야 한다.

작업순서: Base Body → Action Body → Base Marker Point → Direction Vector 1 → Direction Vector 2

(7) Distance

Distance조인트는 두 Body와 떨어져 있는 두 Point를 선택하면 생성된다. 떨어져 있는 두 Point는 해석되는 동안 계속 동일한 거리를 유지하게 된다.

작업순서: Base Body → Action Body → Base Marker Point → Direction Vector 1 → Direction Vector 2

2. Subsystem

RecurDyn의 Database는 Model과 Body 그리고 Subsystem이 서로 독립적인 DB를 구성하고 있으며, 특히 Subsystem의 경우 독립적인 해석까지 가능하다. 뿐만 아니라 Subsystem은 복사 이동 삭제가 자유로워 복잡한 시스템을 구성할 때 매우 유용하게 사용 할 수 있다.

1) RecurDyn Database 구조 및 Subsystem

Subsystem이 독립적이라는 의미는 매우 중요하다. 이 독립성 때문에 Subsystem이 보유하고 있는 어떠한 Entity도 다른 Subsystem에 중복이름의 존재를 허용한다. 심지어 Subsystem을 그대로 복사하여 동일 Subsystem의 하위에 두는 것을 허락한다. 이는 RecurDyn Subsystem의 특징이자 가장 큰 장점중의 하나이다.

아래의 그림은 RecurDyn subsystem의 Tree구조가 어떤 형태로 구성할 수 있는지를 보여준다.

Model

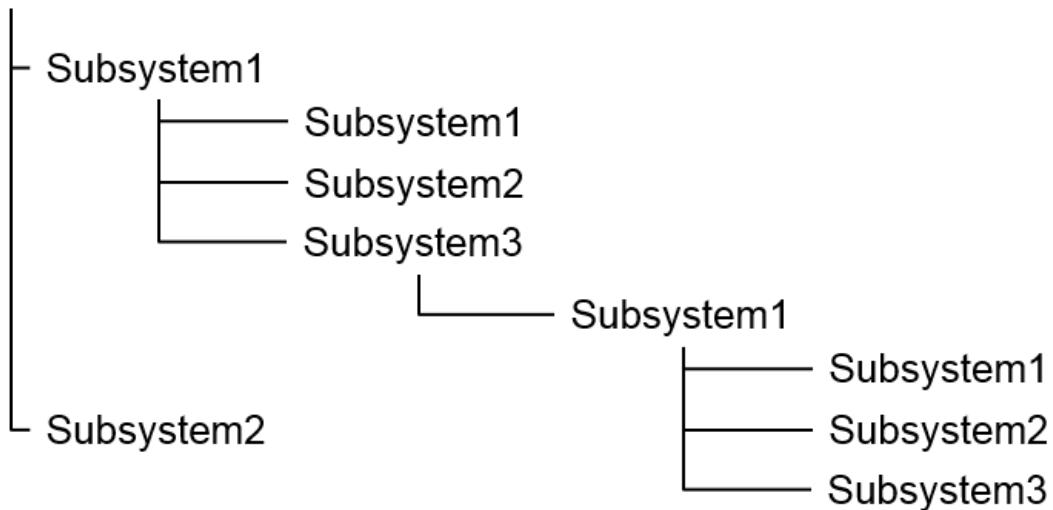


Figure 102 RecurDyn의 Subsystem구성도

- RecurDyn Subsystem의 특징은 다음과 같다.
- File로 Export Import 가능
- Copy & Paste 가능
- Subsystem 수준간의 자유로운 이동 가능
- PPC(parametric point connector) 또는 PVC(Parametric value connector)를 이용하여 데이터 공유 가능
- Subsystem중복 생성 가능
- Subsystem내부에서 독립적 해석 가능
- 상위 수준에서 하위수준 Subsystem의 Entity 사용 가능
- 하위수준은 상위수준과 독립적이지만 PPC PVC로 연동가능

2) Subsystem 생성 방법

Subsystem은 직접 Subsystem Creation을 이용하여 생성 할 수 있지만 생성한 Model 을 Subsystem으로 Export하여 재사용할 수 있다. 일반적으로 후자의 방법을 더 권장한다.

(1) Subsystem의 직접 생성방법

Professional Tab의 Subsystem 버튼을 눌러 Subsystem Mode로 진입하여 Entity를 생성 할 수 있다. 작업 순서는 아래의 그림과 같다.

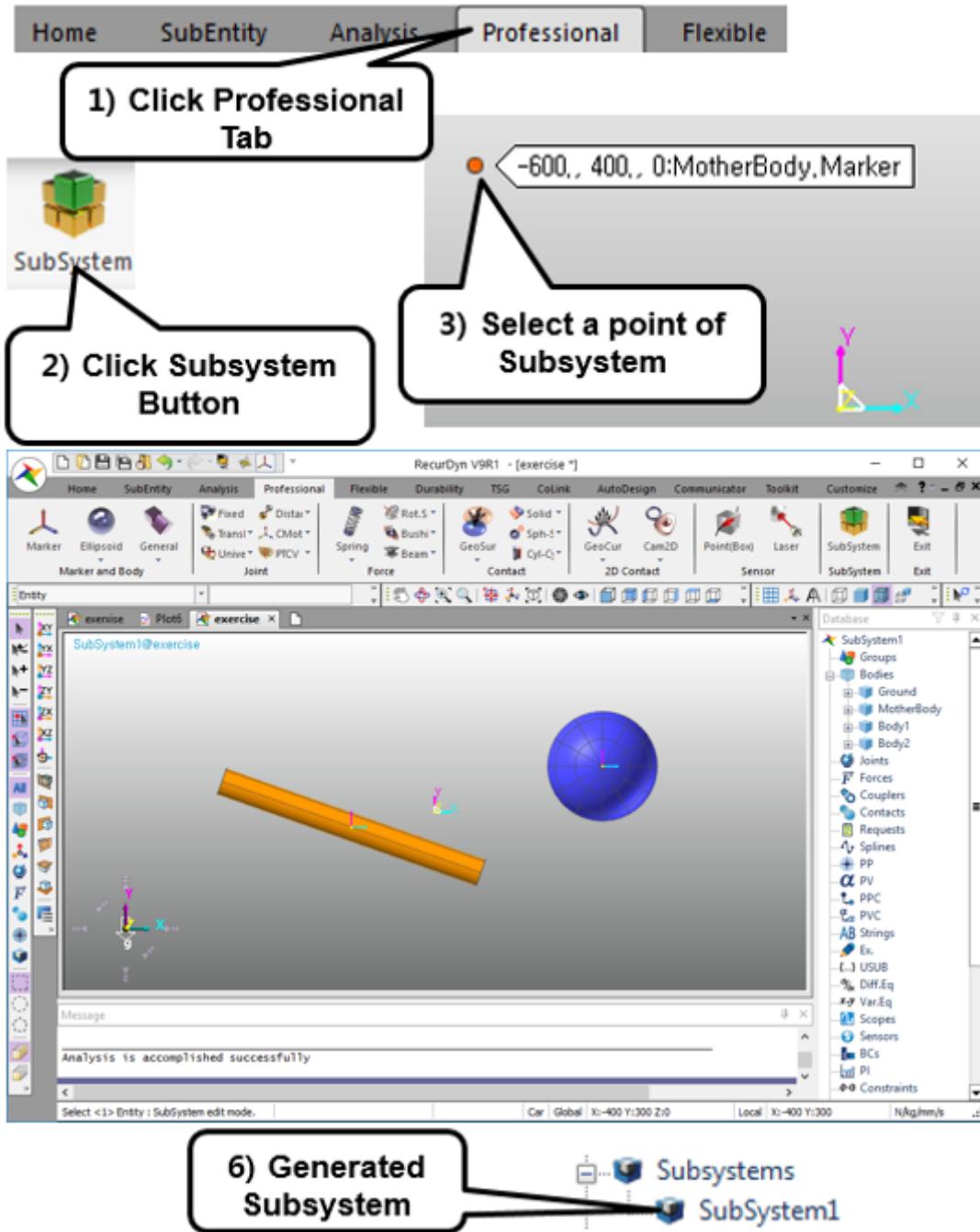


Figure 103 Subsystem 직접 생성방법

(2) Model을 Subsystem으로 Export 하는 방법

생성된 Model을 Subsystem으로 Export할 수 있다. 생성된 Subsystem의 확장자는 rdsb이며 이 파일은 그대로 다른 모델에 Drag Drop 또는 Import하면 Subsystem으로 인식되어 만들어진다.

작업 과정은 아래의 그림과 같다.

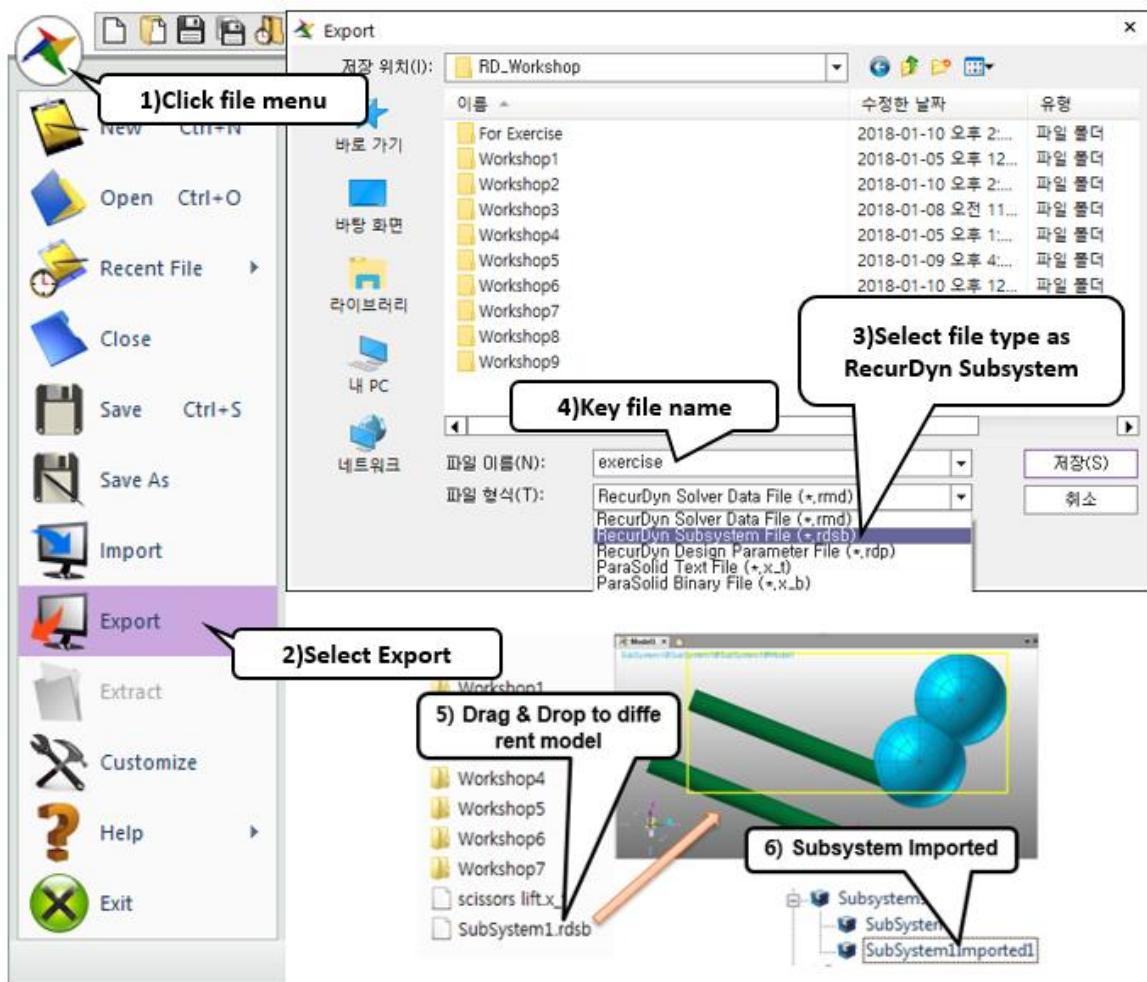


Figure 104 Subsystem export & import방법

3) Subsystem 설정, 삭제, 이동 및 복사

Subsystem은 Subsystem 자체의 좌표계를 가지며 이 좌표계는 상위 단계의 모델 또는 Subsystem에서 이동 및 회전할 수 있다. 그리고 Subsystem을 수정하기 위해서는 Subsystem 모드로 진입해야 한다

(1) 수정

Subsystem을 수정하기 위해서는 해당 Subsystem을 선택하고 Working Window에서 더블 클릭하거나 Database에서 해당 Subsystem을 선택하고 마우스 오른쪽버튼을 눌러 나타나는 메뉴에서 ‘Edit’ 기능을 선택하면 된다. Subsystem Edit mode로 진입한 후의 작업과정은 일반적인 RecurDyn모델링 방법과 동일하며 빠져 나올 때는 Working Window의 마우스 오른쪽 버튼 메뉴에서 ‘Exit’를 선택하거나 Professional Tab의 메뉴에서 가장 오른쪽에 있는 Exit버튼을 누르면 된다.

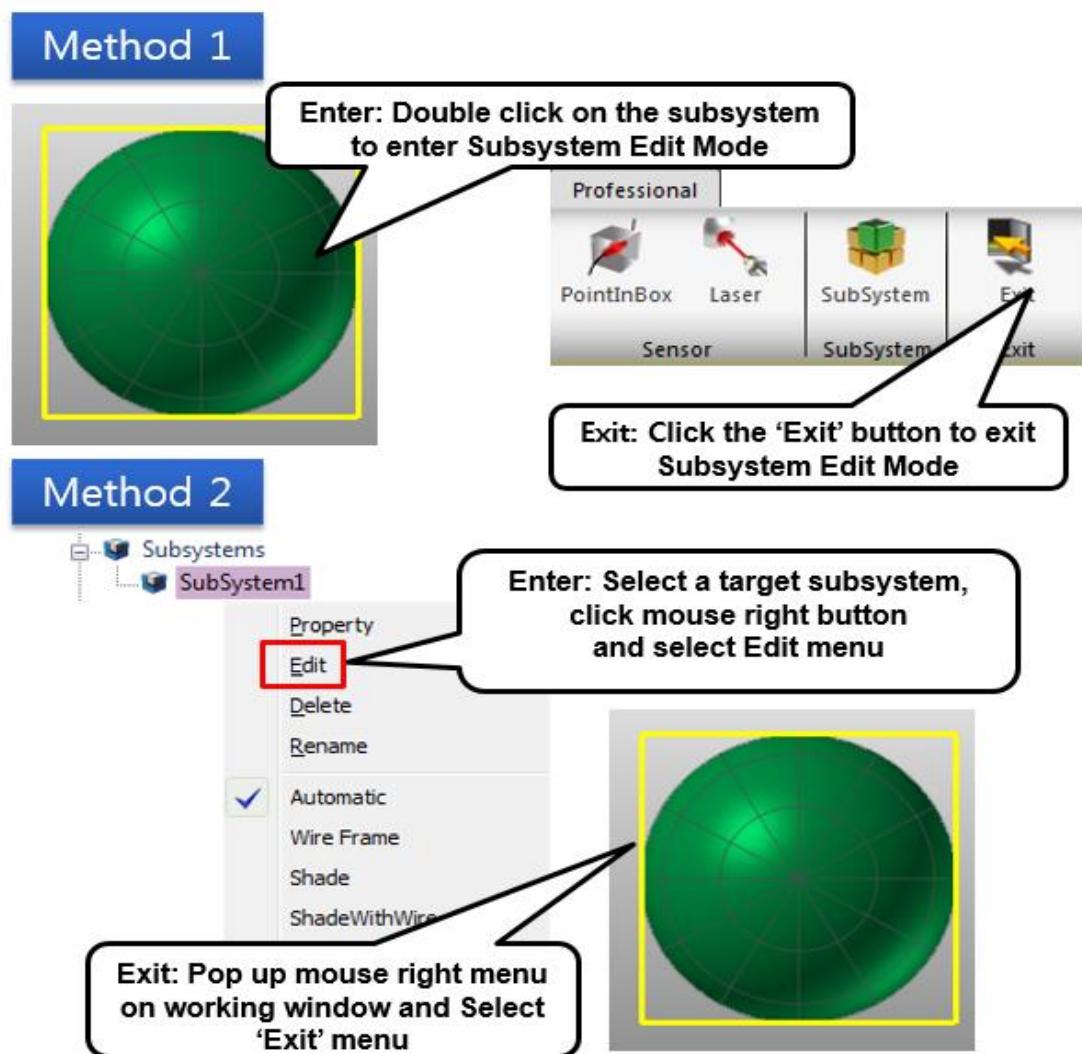
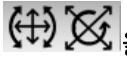


Figure 105 Subsystem mode 진입 및 이탈방법

(2) 삭제

Subsystem을 삭제할 때는 Working Window 또는 Database Window에서 선택된 상태에서 ‘Del’ 키를 누르면 간단히 삭제된다

(3) 이동

Subsystem은 Move Tool 을 이용하여 이동 및 회전할 수 있으며, Body나 Marker와 같이 Subsystem의 Property창을 열어 직접 좌표와 자세를 설정 할 수 있다.

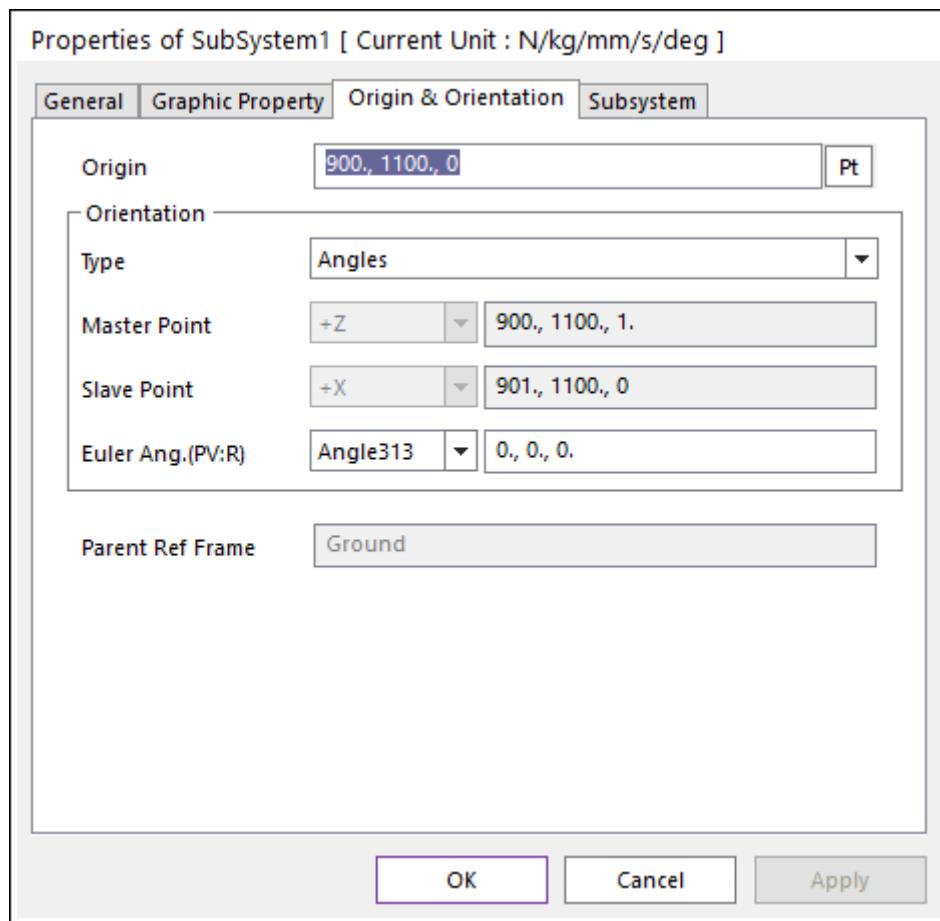


Figure 106 Subsystem 위치 및 자세 설정을 위한 Property창

(4) 복사

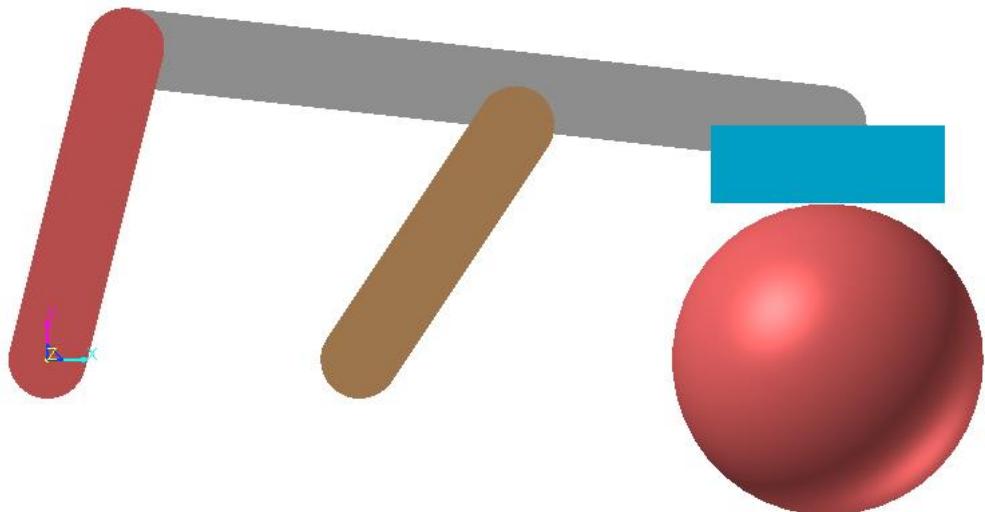
Subsystem은 객체연계매입(OLE)기능과 같이 Ctrl + ‘c’ 와 Ctrl + ‘p’ 버튼을 이용하여 복사 및 붙여넣기를 할 수 있다.

Workshop 7 Gripper (2)

내용: Workshop 6에서 만든 Gripper모델을 이용하여 나머지 반대쪽을 Subsystem으로 만들어 Assembly모델링을 수행한다.

본 워크샵을 통해 아래의 관련기능을 익힐 수 있다

- Primitive Joint모델링 및 활용
- Subsystem 생성방법
- Assembly모델링 수행시 Subsystem사용방법

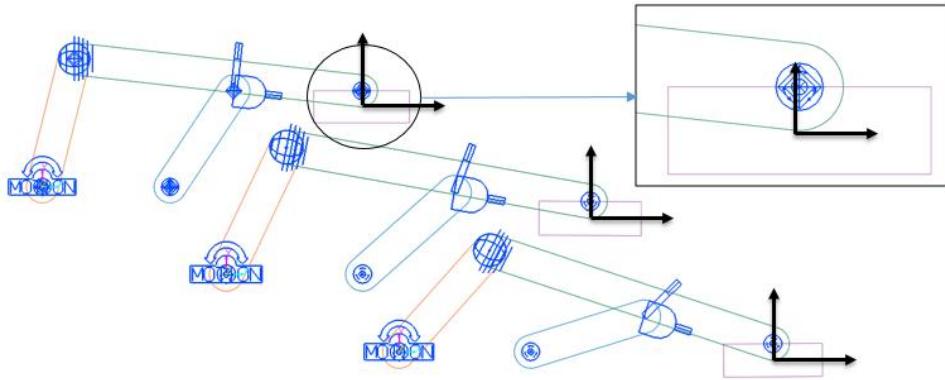


수행시간	40분
난이도 Level	1

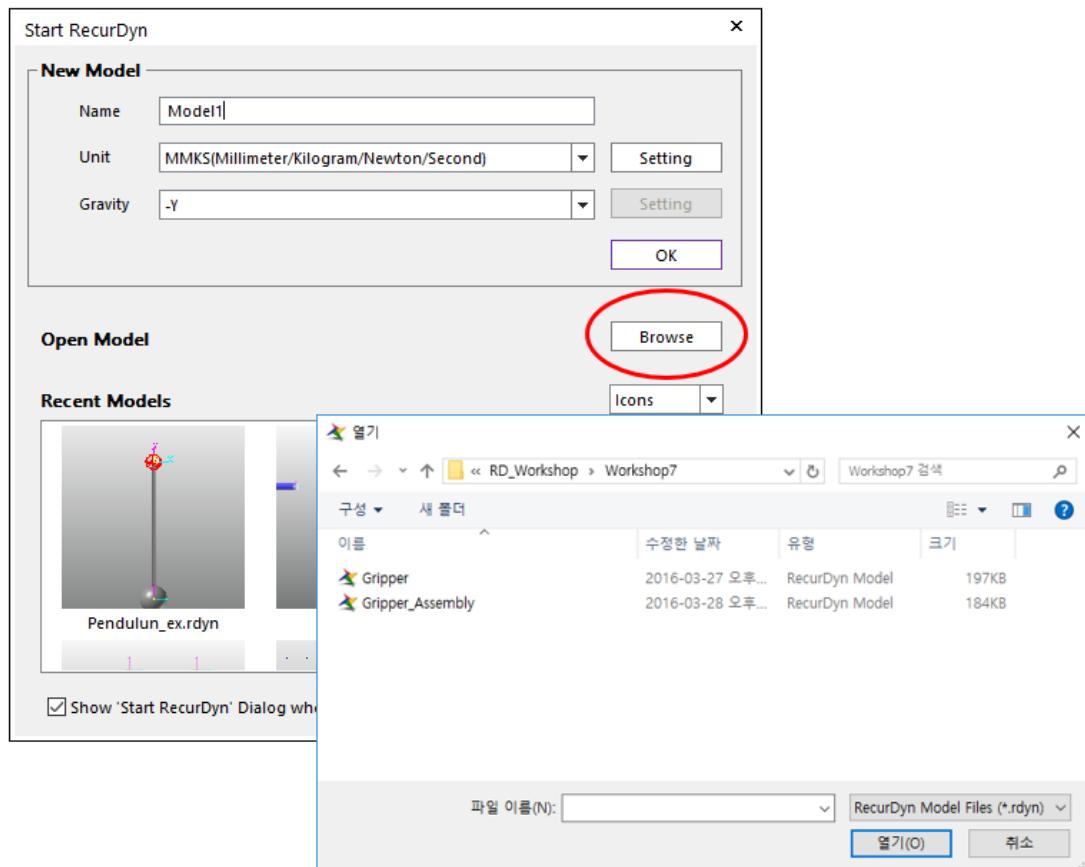
Workshop 수행을 위해 필요한 사항

- RecurDyn Professional
- Workshop 6 Gripper Model

STEP 1 Workshop 6에서 생성한 Gripper모델을 RecurDyn으로 불러들여 Primitive Joint를 이용하여 모델링 수정 후 Subsystem으로 출력, Primitive Joint는 Gripper의 Grip Body가 항상 수평을 유지하도록 구속을 주기 위하여 입력한다. 이 구속이 없다면 Griper가 공간상에 이동하는 동안 Grip Body가 Pendulum처럼 흔들리게 된다

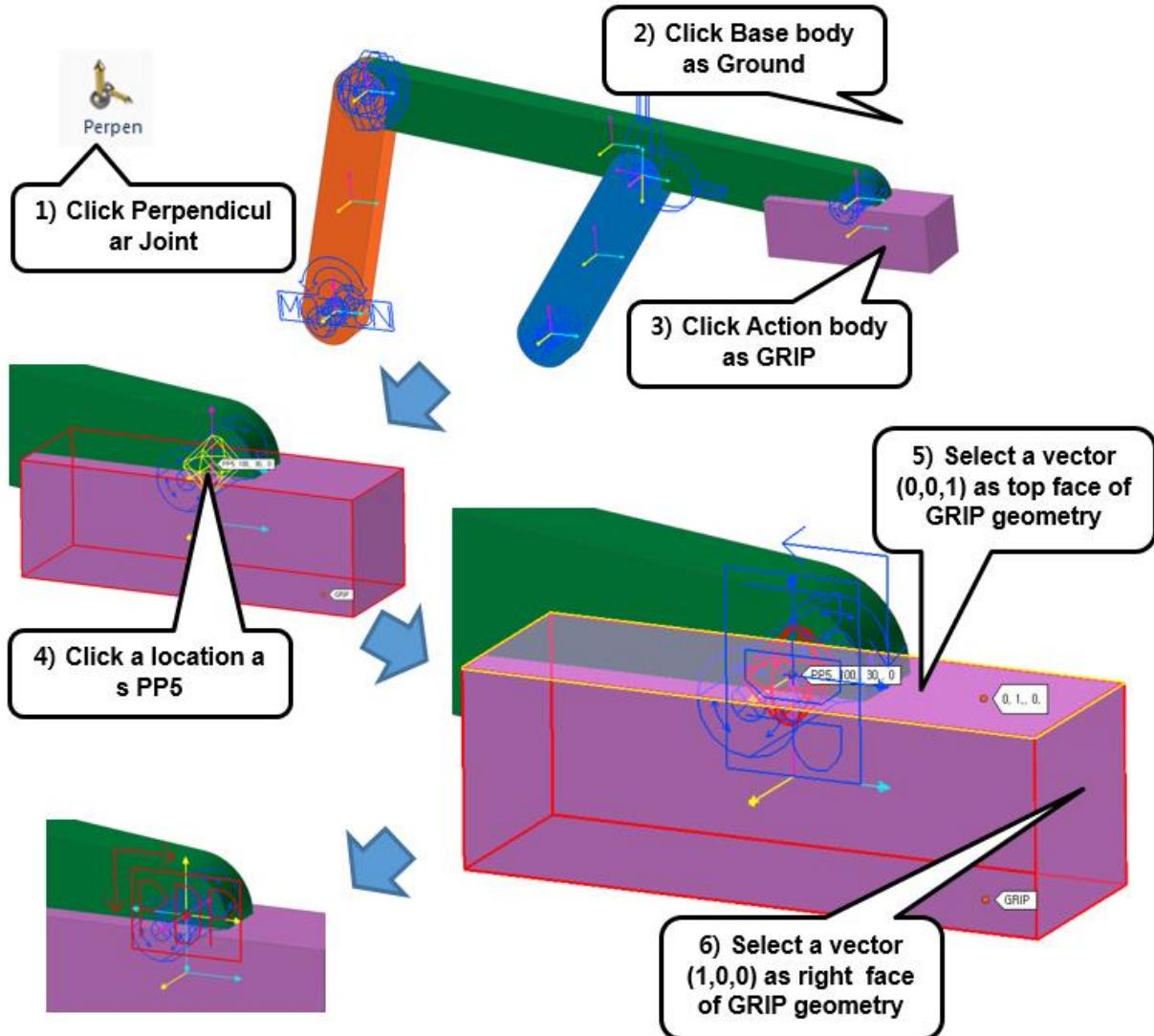


1. RecurDyn을 실행 시킨 후 Workshop6에서 수행한 Gripper모델을 불러들인다. 이 때 불러들이는 방법으로 실행 후 Start RecurDyn창에서 Browser버튼을 이용하여 직접 파일을 불러 들일 수도 있으며, 팀색기에서 Gripper.rdyn파일을 더블 클릭하면 불러들여진다.



2. Professional Tab을 누르고 Joint Group에서 Perpendicular Joint  를 선택하고

Base Body는 Ground로 Action Body는 GRIP Body를 선택한 후 Grip.CM의 Marker위치에 생성하고 서로 수직인 두 벡터는 (1,0,0)과 (0,0,1)을 선택한다. 이 과정을 아래의 그림에 상세히 설명되어 있다.



3. Analysis Tab의 Dyn/Kin 버튼을 눌러 1초동안 100Step으로 시뮬레이션을 수행하고 Animation을 통해 Griper가 흔들리지 않고 수평상태를 유지하는지 확인해 본다.

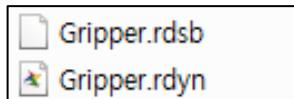
STEP 2 현재의 모델을 Subsystem파일로 Export

1. 파일 메뉴  의 Export버튼  Export를 눌러 Save창이 나타나게 한다.

2. 파일형식(File Type)을 RecurDyn Subsystem File로 선택, 원하는 폴더로 이동하고 원하는

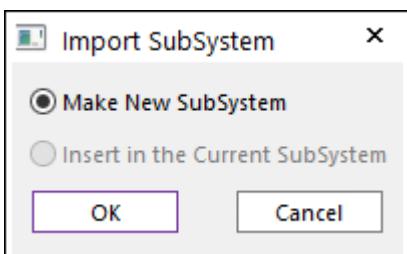
파일명(ex:Gripper)을 입력한 후 저장(Save)버튼을 누른다.

3. 탐색기를 열어 출력된 파일을 확인한다.



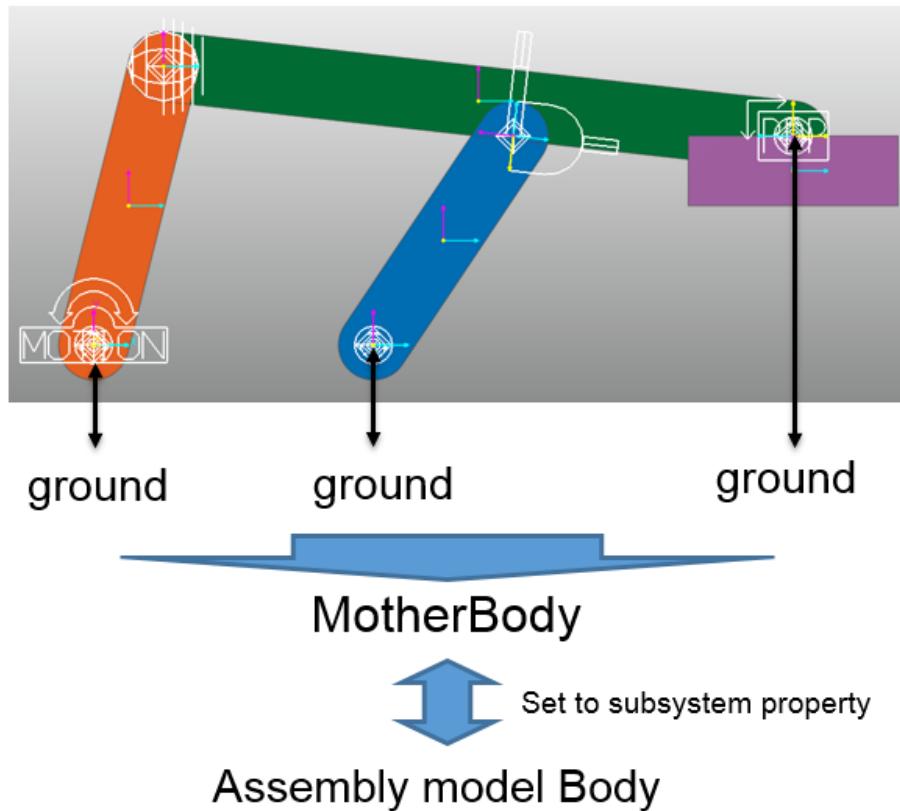
STEP 3 새로운 RecurDyn모델을 생성하고 서브시스템을 불러들인 후 모델을 필요에 따라 수정

1. RecurDyn에서 New Model Button 을 눌러 새로운 모델을 생성시킨다. 버튼을 누르면 자동으로 Start RecurDyn 창이 나타나며 Model명에 Gripper_Assembly라고 입력한 후 Ok 버튼을 누름
2. 파일버튼 을 누르고 Import 메뉴를 선택하면 파일열기 box가 나타난다.
3. 미리 출력해 두었던 Subsystem 파일(Gripper.rdsb)을 선택한후 열기(open)버튼을 누른다
4. Import Subsystem Dbox가 나타나면 Ok버튼을 눌러 화면에 Subsystem이 불러들여 지는 것을 확인한다.



5. Database Window에서 Subsystems에 입력된 Subsystem의 이름을 Gripper1으로 바꿔준다

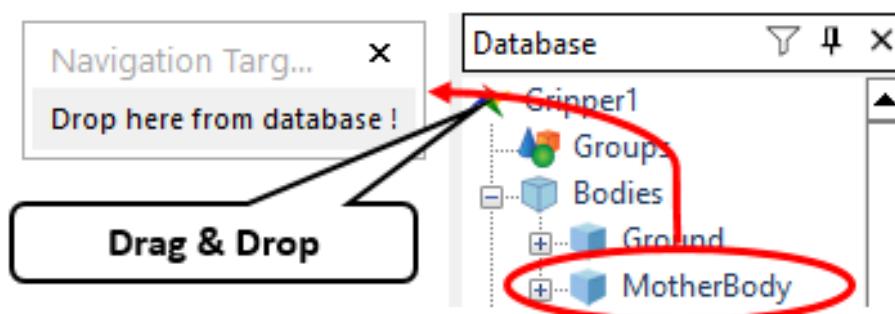
STEP 4 Subsystem Edit Mode로 진입하여 모델을 수정한다. 이 때 수정할 사항은 각 조인트의 연결상태에서 Ground에 해당하는 Base Body를 Subsystem의 Mother Body로 변경한다. 이렇게 하면 Model 모드에서 Subsystem의 Mother Body를 Assembly Model의 특정 Body로 인식하도록 설정할 수 있다. 이렇게 지정된 Body는 Subsystem의 Mother Body와 동일하게 인식되어 해석이 수행된다. 따라서 Mother Body를 이용하면 조인트를 연결하는 것보다 효율적으로 Assembly와 Subsystem을 연결 할 수 있다.



1. Working Window에서 Subsystem을 선택하고 더블 클릭하여 Subsystem Edit 모드로 진입 한다
2. Rev_grnd_to_link1 조인트를 선택하고 ‘p’버튼을 눌러 Property창을 연다
3. Include Motion Check버튼을 끈다

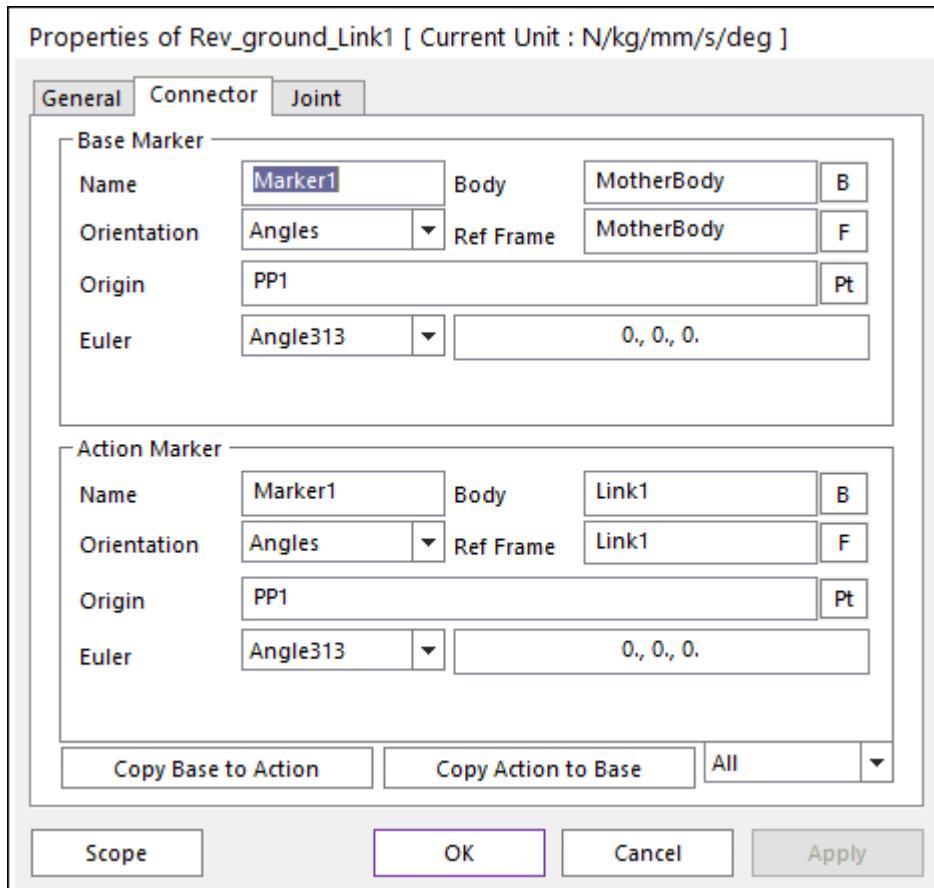


4. Connector Tab으로 이동한다
5. Base Marker Container에서 Body의 B버튼 을 누른 후 Database 창에서 Mother Body를 Drag해서 Navigation Target 창에 Drop한다



※ Navigation Target 창은 어떤 Entity를 선택해야 할 순간 나타나는데 이 창에 Database Window의 Entity를 Drag & Drop하면 해당하는 Entity가 선택된다. 이 기능은 Working Window에서 Entity를 선택하기 곤란할 경우 매우 유용하게 사용 할 수 있다.

6. Ref Frame 창의 내용 역시 동일한 방법으로 ‘Mother Body’로 입력한다.



※ 각 Entity의 입력창은 Entity를 선택하거나 Drag Drop기능을 통해서도 입력할 수 있지만 Entity의 이름을 안다면 Key in해도 되며, Text의 복사 및 붙여넣기를 통한 입력 또한 가능하다.

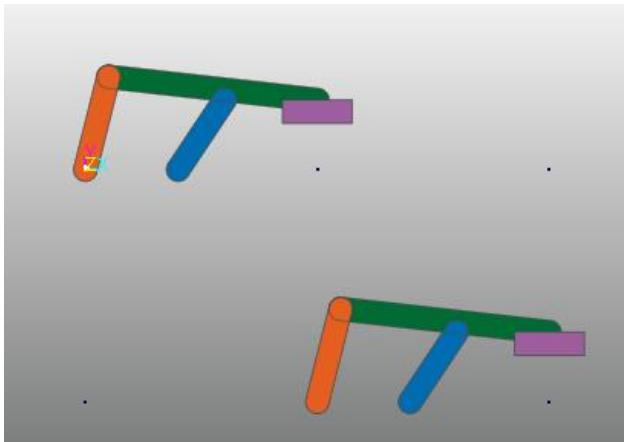
7. Ok버튼을 눌러 Base Body의 변경을 완료한다.

8. 동일한 방법을 통해 Rev_grnd_to_link2와 Perpendicular1의 Base Body를 모두 Mother Body로 변경하여 준다

9. 작업이 완료되면 Exit버튼을 눌러 Subsystem Edit Mode를 빠져 나온다.

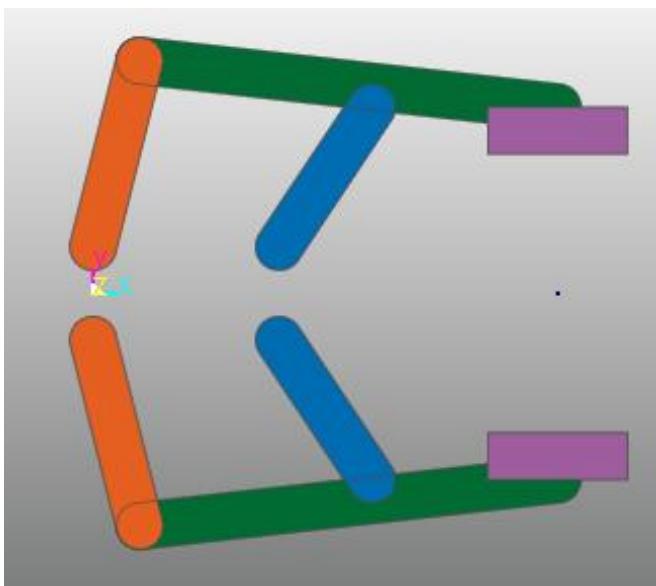
STEP 5 Subsystem의 복사 및 이동

1. Database Window에서 Gripper1 Subsystem을 선택한 상태에서 Ctrl + ‘c’ 버튼을 누르고 다시 Ctrl + ‘v’버튼을 눌러 Subsystem을 복사한다.

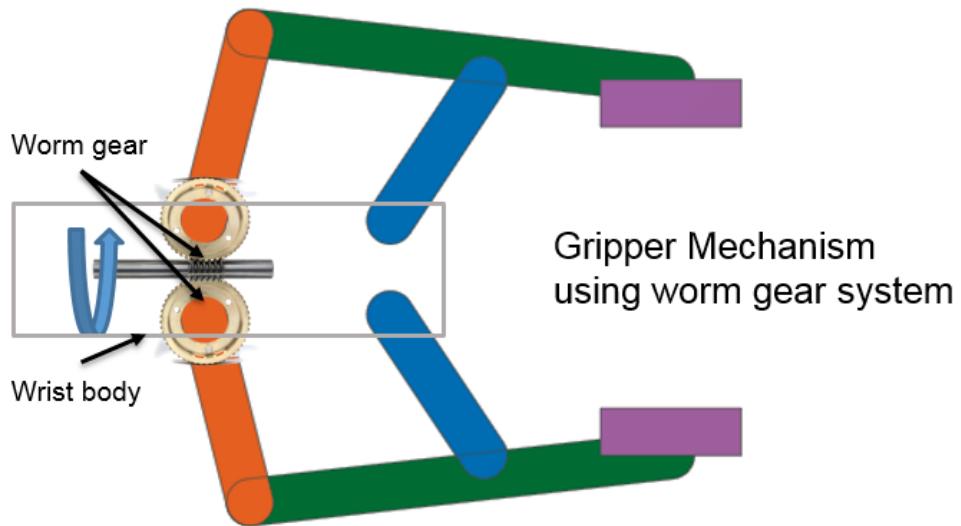


* Default 설정상태에서 복사하기 기능을 사용하면 그림과 같이 x, y, z 각 방향으로 100만큼 Offset 된 상태로 복사된다. 이 Offset 기능을 꺼려면 Home Tab에서 Model setting group의 display버튼을 누르고, 나타나는 창에서 Advanced Tab을 선택한 후 shift when pasting 체크버튼을 꺼면 된다.

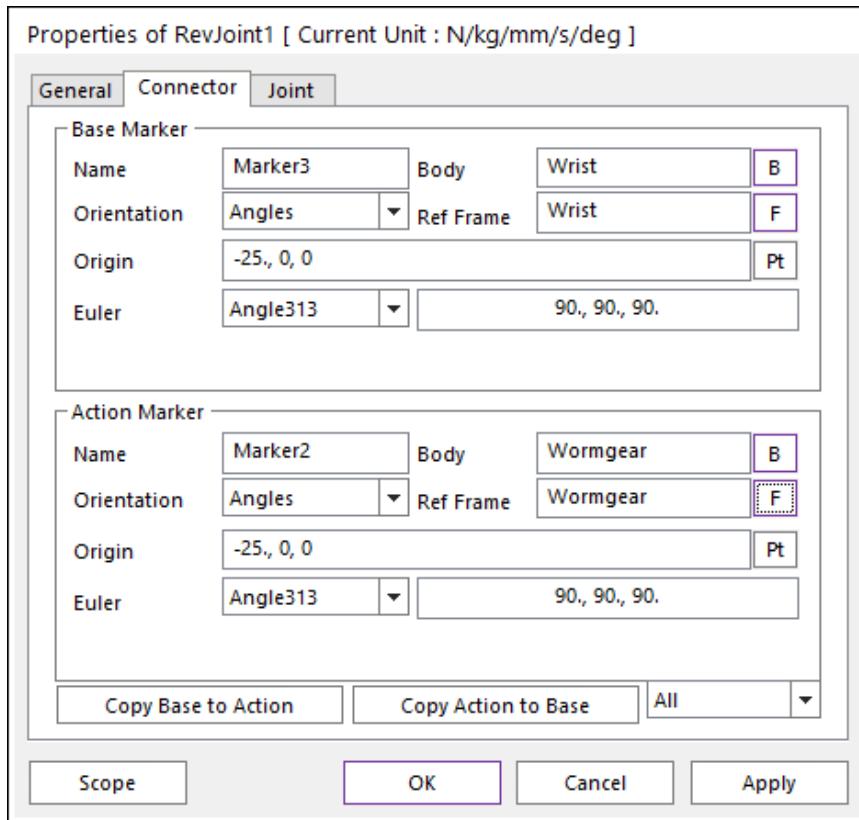
2. 새롭게 복사된 Subsystem의 이름은 C1_Gripper이며 이 이름을 Gripper2로 변경해준다
3. Gripper1 Subsystem을 선택한 상태에서 ‘p’ 버튼을 눌러 Property창을 열고 Origin은 0, 10, 0을 입력하고 ok버튼을 누른다.
4. Gripper2 Subsystem을 선택한 상태에서 ‘p’ 버튼을 눌러 Property창을 열고 Origin은 0,-10, 0을 입력하고 Orientation에는 0,180,0을 입력하고 ok버튼을 누른다.



STEP 6 Wrist body와 worm Gear body생성 및 Mother Body설정과 작동 메커니즘 모델링



1. Professional Tab의 Body Group에서 Link 를 선택 후 -50,0,0과 50,0,0의 위치를 선택하여 body를 생성 한 후, Body의 이름을 WRIST로 입력한다.
Working window에 좌표가 선택되지 않는다면 Grid를 수정하거나 생성옵션 창에서 위치를 직접 입력해주면 된다.
2. 생성된 Body를 더블클릭하여 Body Edit Mode로 진입하고 Link Geometry를 선택하고 Property창을 열어 First Radius와 Second Radius 그리고 Depth에 모두 10을 입력하고 Ok 한 후 Body Edit모드를 빠져나온다.
3. Wrist Body를 Ground와 Fixed Joint로 연결한다. 조인트 생성 위치는 -50,0,0이며 조인트 이름은 Fixed_wrist 이다.
4. Professional Tab의 Body Group에서 Cylinder 를 선택 후 -50,0,0과 0,0,0의 위치를 선택하여 body를 생성 한 후, Body의 이름을 WORMGEAR로 입력한다.
5. Revolute Joint를 WRIST와 WORMGEAR 사이에 Global X방향이 회전축이 되도록 생성하고 조인트이름은 Rev_wrist_to_worm으로 입력한다, 생성 시 위치나 방향이 정상적으로 입력되지 않더라도 Property창에서 수정을 통해 변경할 수 있으므로 초기 생성단계에서 정확한 위치와 벡터를 정하는 것에 대해 부담을 가질 필요는 없다.
조인트의 위치는 -25, 0, 0이며 Orientation 321방법으로 0, 90, 0이다.



6. Worm gear을 작동시키기 위한 Expression을 생성한다. SubEntity Tab을 선택하고



을 선택한 후 Create버튼을 눌러 Expression을 생성한다. 함수의 이름은 Ex_Motion으로 입력하고 내용은 다음과 같다.

$720d*step(time,0,0,1,1)$

Expression List					
Expressions					
No	Name	Expression	Value	Comment	
1	Ex_motion	$720d*step(time,0,0,1,1)$	E	0	

7. 생성한 Expression을 Rev_wrist_to_worm조인트에 모션을 입력한다. Rev_wrist_to_worm 조인트를 선택한 후 Property창을 열고 Motion에서 Include Motion을 Check On한다.

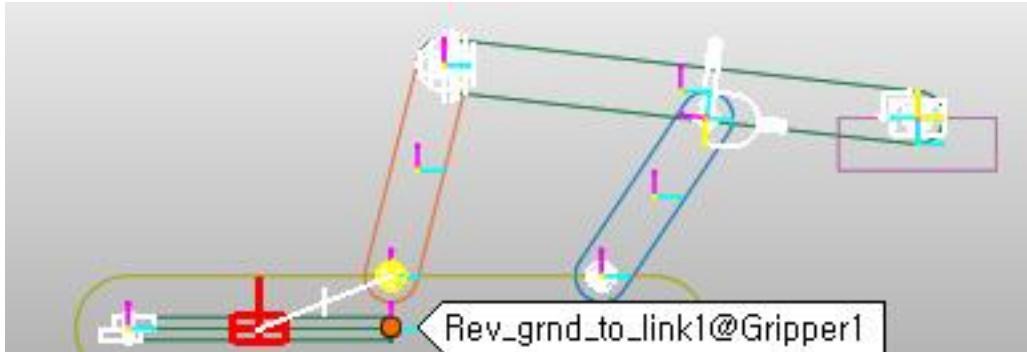
8. Motion버튼을 누르고 생성한 Expression인 Ex_Motion을 선택하고 Ok하여 빠져 나온다.

STEP 7 Subsystem의 Joint와 Rev_wrist_to_worm조인트 사이에 Coupler를 생성하여 WormGear가 회전하면 Gripper가 작동하도록 모델링

1. Professional Tab의 Joint Group의 Coupler  를 선택한다. 첫 번째 선택에서

Rev_wrist_to_worm조인트를 클릭, 두 번째 조인트를 선택하기 위해 Shift버튼을 누른다.

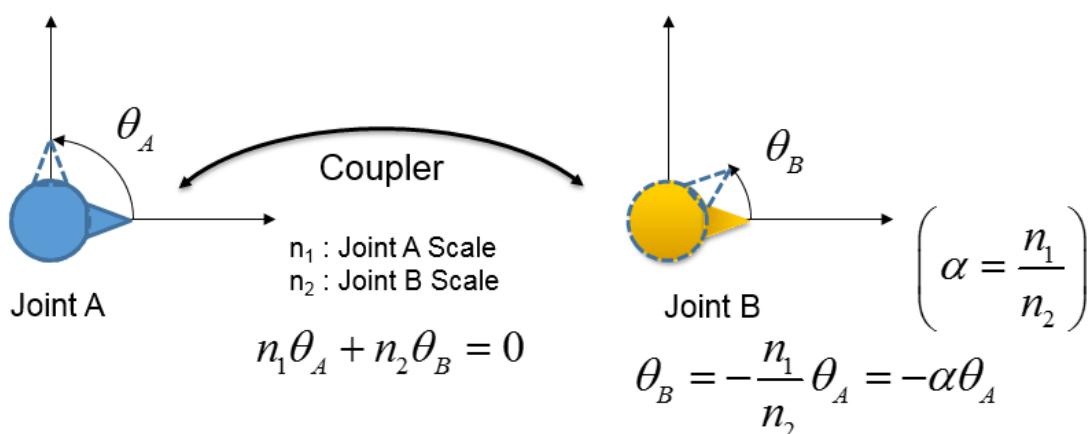
Shift 버튼을 누르면 Subsystem의 모든 Entity Icon이 Working Window에 표시된다. 이 상태에서 Rev_grnd_to_link1@Gripper1을 선택한다.



2. 동일한 방법으로 Rev_wrist_to_worm과 Rev_grnd_to_link1@Gripper2사이에 Coupler를 생성한다. 그리고 완성된 Coupler의 이름을 그림과 같이 변경해 준다

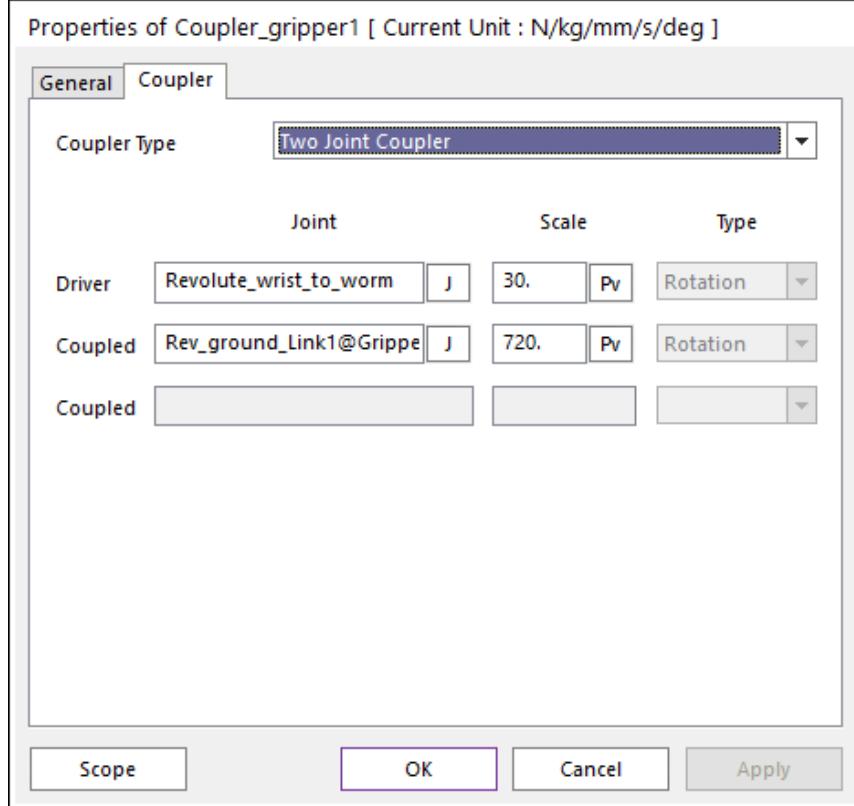


* Coupler는 두 조인트 사이의 자유도에 대한 관계식을 묶어주는 기능을 한다. Revolute 조인트 두 개를 Coupler로 연결시키면 마치 Gear와 같이 Driver가 a도 움직이면 다른 조인트가 $a \times b$ 도 움직인다. 곱해지는 값이 b가 Scale이며, 이 Scale을 조정하면 원하는 Gear메커니즘을 만들 수 있다.



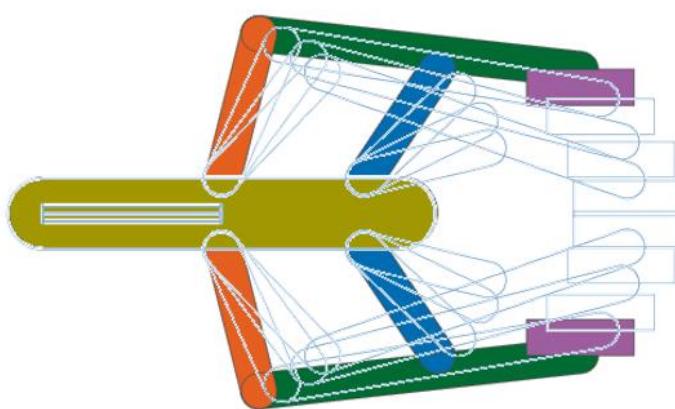
3. 생성된 Coupler는 두 조인트 사이의 관계를 만들어 주는 것이다. Coupler의 property창을 열어 아래와 같이 입력해 준다.

(다음페이지 참조)



STEP 8 Simulation 및 해석 결과 Review

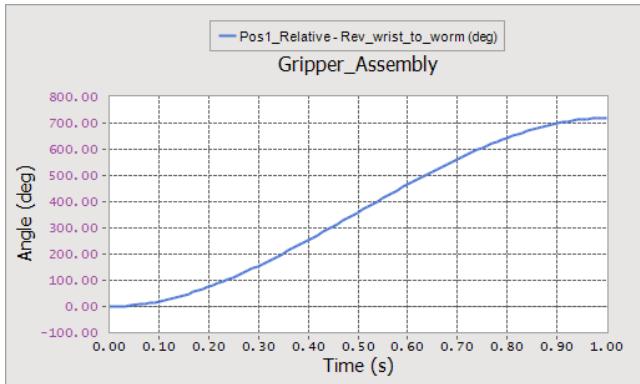
1. 1초동안 100Step으로 시뮬레이션 수행 후 Animation으로 결과를 확인 해 본다



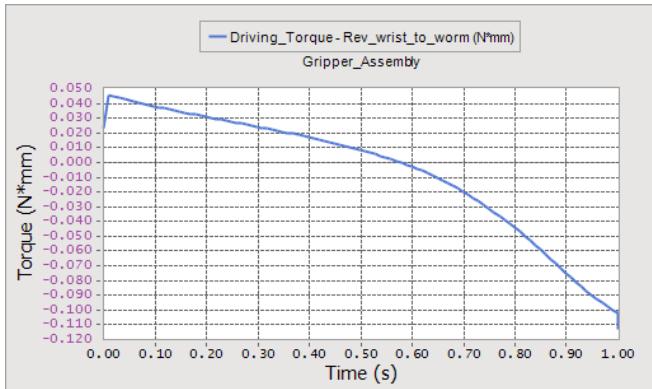
2. Plot_Result 버튼  을 눌러 Postprocessor로 이동한다.

3. Plot database window에서 Gripper_Assembly/Joints/Rev_wrist_to_worm/Pos1_Relative

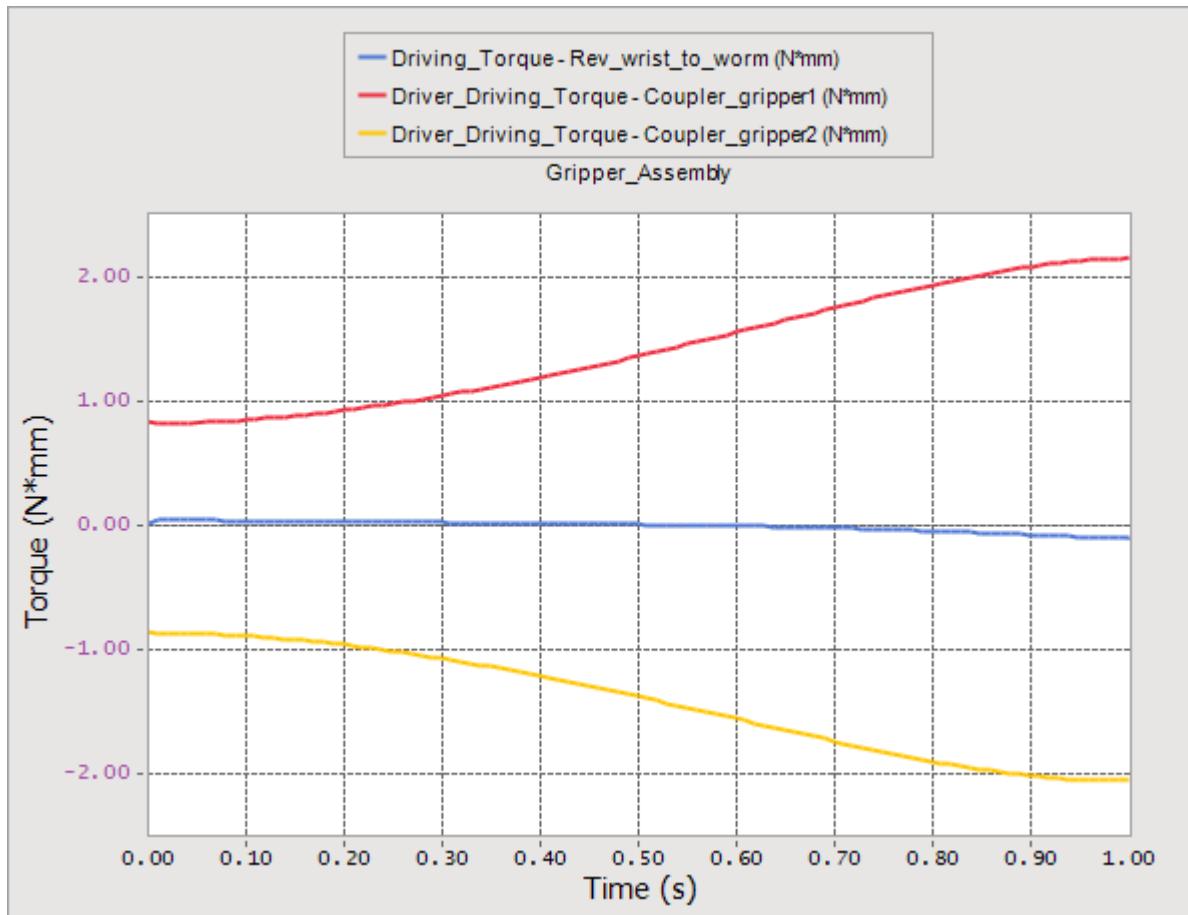
를 그려서 Worm Gear의 작동 각도를 확인해 본다. Worm Gear 는 1초동안 720도 회전한다



4. Plot database window에 Gripper_Assembly/Joints/Rev_wrist_to_worm/Driving_Torque를 그려서 Worm Gear의 작동 토크를 확인해 본다



5. 4번에서 그린 그래프 위에 Plot database window에
Gripper_Assembly/Couplers/Coupler_gripper1/Driver_Driving_Torque와
Gripper_Assembly/Couplers/Coupler_gripper2/Driver_Driving_Torque를 그려본다. 두
Coupler의 Driver는 Rev_wrist_to_worm이며, Coupler의 두 합력이 Motion의 Reaction
Torque로 나타남을 알 수 있다.



Chapter 8. Force

Lecture:

RecurDyn에서 사용할 수 있는 여러 가지 힘 요소에 대한 여러 가지 생성 방법 및 힘 수 정의 방법을 알아보고, 이 기능을 이용하여 hand pressing machine에 대한 동역학 모델링을 수행하고 기능을 익힌다

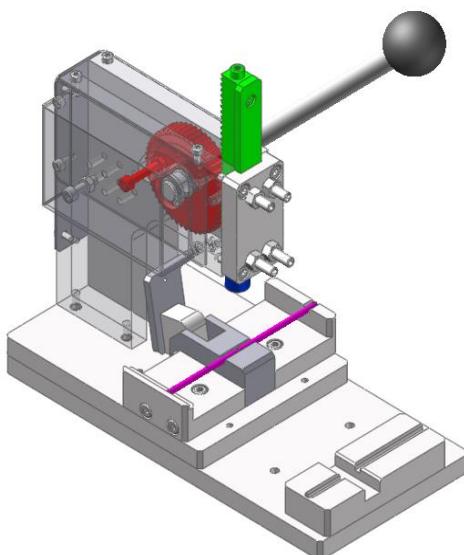
Workshop

힘 요소를 이용한 Hand Pressing Machine을 모델링하고, 해석 결과를 분석해 본다



소요 시간

강의명	시간(분)
힘 요소에 대한 설명 힘 요소의 모델링 및 활용	30 분
Hand press machine 모델링	30 분
총합	60 분



1. 힘 요소와 운동방정식의 관계

1) 운동방정식에서 힘 요소의 역할

힘 요소와 운동방정식의 관계를 3장에서 간단히 소개한 바와 같이 다물체 동역학의 운동방정식은 아래의 미분대수 방정식으로 유도된다.

$$\begin{bmatrix} m & \Phi_q^T \\ \Phi_q & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\boldsymbol{q}} \\ \boldsymbol{\lambda} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Q} \\ \boldsymbol{\gamma} \end{bmatrix} \quad \begin{cases} m: \text{mass} \\ \ddot{\boldsymbol{q}}: \text{degree of freedom} \\ \mathbf{Q}: \text{External force} \end{cases}$$

이때, 힘 요소는 다물체 운동방정식에서 우측항의 Q항에 대입된다. 예를 들어, 여러 바디들과 조인트 및 힘으로 구성된 다물체계에서 바디의 경우 여러 연결 관계에 의해서 아래의 그림과 같이 여러 힘 들이 작용할 수 있다.

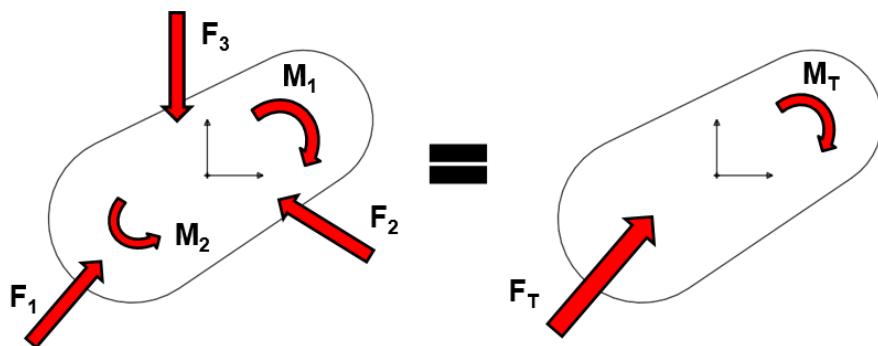


Figure 107 바디의 여러 힘의 작용과 등가 힘 모델의 관계

이때, 강체는 힘에 의한 변형을 허용하지 않기 때문에 이러한 여러 힘들 즉 방향과 크기를 갖은 벡터들의 합 벡터와 모멘트로 구할 수 있다.

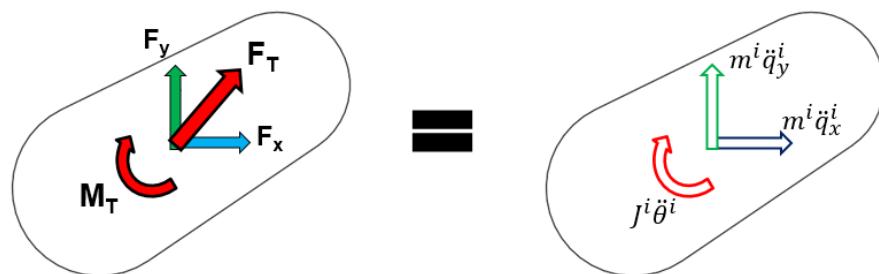


Figure 108 일반화 힘과 벡터의 분력

또한, 이러한 합 벡터를 바디의 기준 좌표계인 바디 좌표계로 힘을 이동 및 변환하여 표현할 수 있는데, 이러한 바디 좌표계로 표현된 힘을 일반화 힘(Generalized Force)이라고 한다. 이러한 일반화 힘은 각각의 바디 좌표들로 힘 요소들이 표현되어 있기 때문에

다물체 동역학의 운동방정식에 Q항에 대입이 가능하다. 다음의 간단한 예를 통해서 일반화 힘을 구하고 운동방정식에 대입하는 방법에 대해서 알아보자.

2) 스프링과 댐퍼 모델

스프링이란 외부에서 힘을 가하면 변형되었다가 힘이 제거됐을 때 자체 탄성을 이용하여 원래의 상태로 되돌아오는 기계요소를 스프링이라 한다. 이러한 스프링은 모양이나 재료에 따라 코일 스프링, 판 스프링, 태엽 스프링, 고무 스프링, 공기 스프링, 유압 스프링 등 다양하다. 또한, 댐퍼란 진동 에너지를 흡수하는 장치를 말하며 제진기, 흡진기라고도 한다. 아래 그림과 같이 보통 스프링과 댐퍼 이 두 가지를 결합한 장치가 자동차나 철도 차량의 바퀴와 차체 사이의 현가 장치에 설치되어 노면에서부터 올라오는 진동을 흡수하여 차체와 승객에게 전달되는 충격을 완화시키는 역할을 한다.



Figure 109 실제 스프링과 댐퍼

(1) 병진 스프링 및 댐퍼

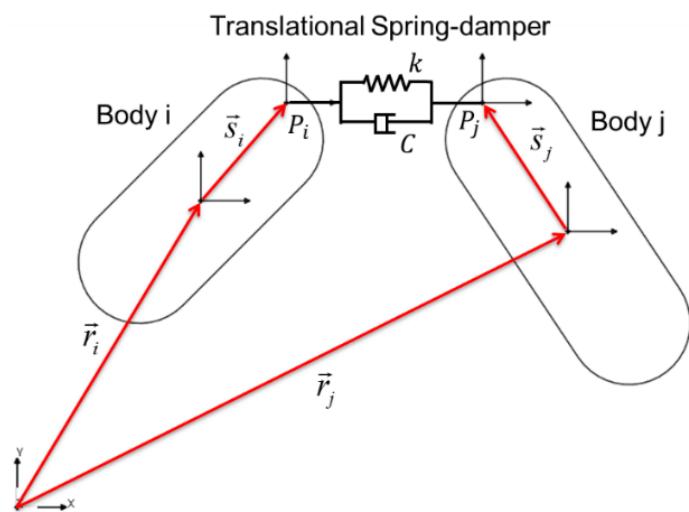


Figure 110 병진 스프링 및 댐퍼 힘 요소

위의 그림은 바디 i 와 바디 j 사이에 병진 스프링-댐퍼 힘 요소로 연결된 상태를 보여주는 그림이다. 스프링으로 연결된 두 바디가 외력에 의해 움직이게 되면 스프링-댐퍼의 길이가 변화하게 되고, 그 길이 변화에 따라 스프링의 최초 길이로 돌아가려는 복원력과 외력을 완충 시키는 감쇠력이 발생하게 된다. 이와 같이 발생된 복원력과 감쇠력이 각각 두 바디에 다시 작용되어 스프링에 의한 두 바디의 움직임을 갖게 된다.

병진 스프링-댐퍼의 힘 계산식은 다음과 같이 스프링의 길이 변위, 속도와 스프링 강성 계수(Stiffness Coefficient)와 감쇠계수(Damping Coefficient)에 의해 계산된다.

$$f_s = k(\ell - \ell_0) + c\dot{\ell} \quad \text{where, } \vec{\ell} = \vec{r}_i + \vec{s}_i - \vec{r}_j + \vec{s}_j$$

계산된 힘 f_s 는 작용력과 반작용 법칙에 의해서 다음 그림과 같이 i 바디와 j 바디에 각각 힘으로 작용하며, 이 스프링 힘이 일반화 힘 Q_i 와 Q_j 로 변환되어 운동방정식에 대입된다.

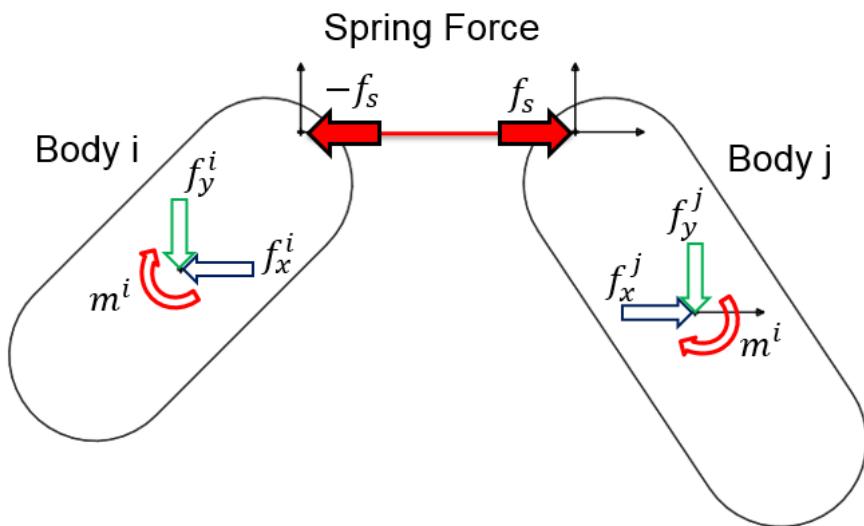


Figure 111 병진 스프링 및 댐퍼 힘의 계산

$$Q_i = \begin{bmatrix} f_x^i \\ f_y^i \\ \tau^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -f_s \cos \theta_i \\ -f_s \sin \theta_i \\ -f_s d_i \cos \theta_i + f_s d_i \cos \theta_i \end{bmatrix}$$

$$Q_j = \begin{bmatrix} f_x^j \\ f_y^j \\ \tau^j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_s \cos \theta_j \\ f_s \sin \theta_j \\ f_s d_j \cos \theta_j - f_s d_j \sin \theta_j \end{bmatrix}$$

(2) 병진 스프링의 생성방법

스프링의 생성방법은 아래의 그림에서의 순서와 같이 스프링 아이콘을 클릭한 뒤, 생성 옵션을 고른 후 두 바디를 순서대로 선택하고, 마지막으로 스프링이 생성될 두 포인트를 입력하면 스프링이 생성된다. 입력한 두 포인트에 마커 두 개가 자동 생성되고 이 두 마카는 두 바디에 각각 하나씩 속하게 되고, 해석 중 이 두 마커의 길이를 측정하여 스프링의 변위를 계산하게 되고 이 변위로부터 스프링 힘을 계산하게 된다. 또한, 생성된 스프링의 물성치(Property) 다이얼로그를 열고 스프링의 강성 계수(Stiffness Coefficient), 감쇠계수(Damping Coefficient) 그리고 필요한 여타 파라미터를 수정하고 다이얼로그를 닫으면 해당 파라미터가 적용된 스프링 동역학 모델링을 해석 수행할 수 있게 된다. 이때, 생성된 스프링의 자유 길이(Free Length)는 스프링 생성시의 두 Marker 사이 값을 기본적으로 자유 길이로 동일하게 정의하는데, 스프링이 만약 인장/압축되어 있는 상태의 모델링을 원한다면 자유 길이를 두 Marker 사이 길이(Distance between Two Markers) 보다 작게 수정하면 인장된 스프링을 모델링 할 수 있으며, 반대로 두 Marker 사이 길이 보다 길게 하면 압축된 스프링을 모델링 할 수 있다.

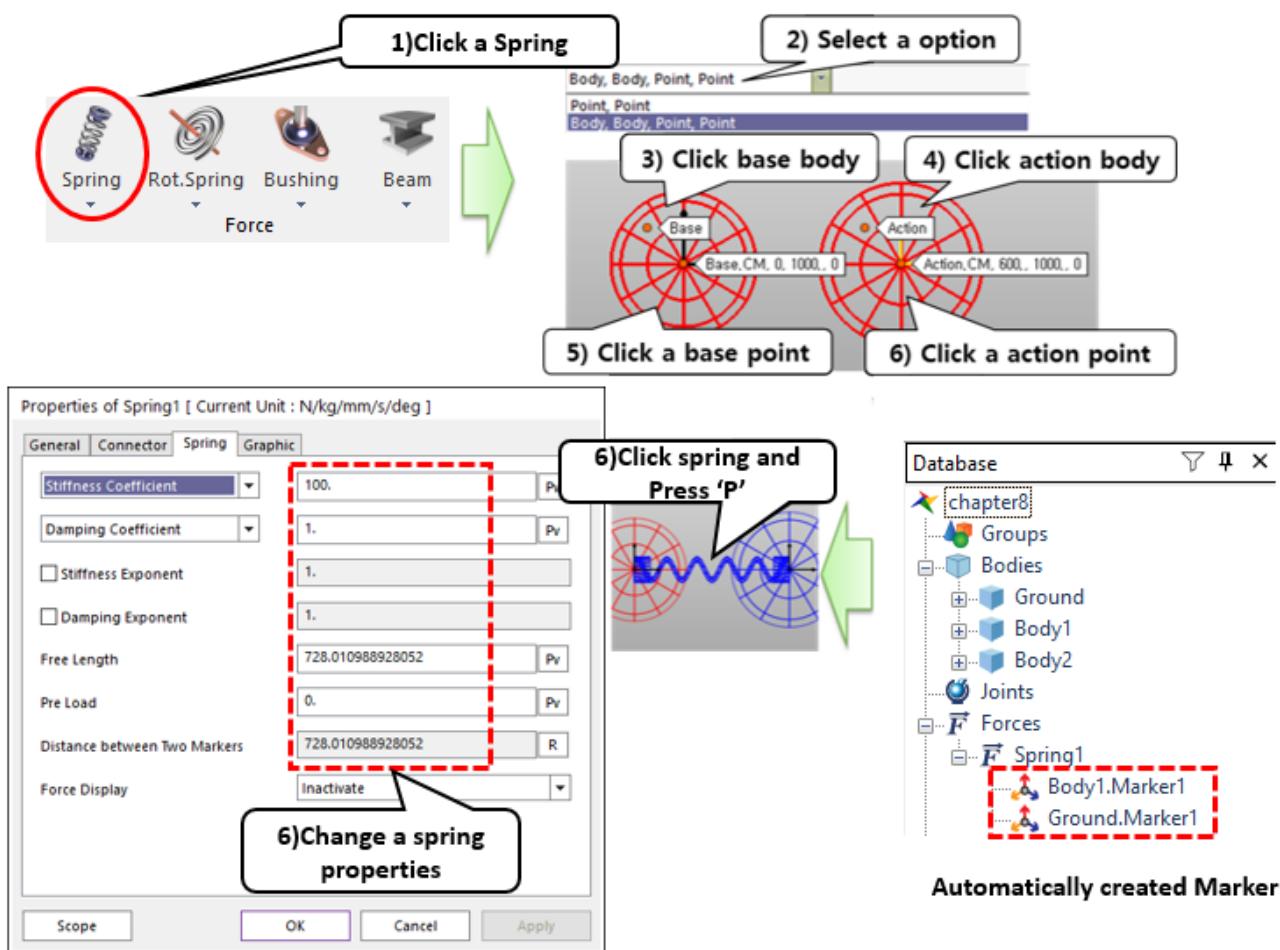


Figure 112 병진 스프링 생성 방법

(3) 회전 스프링 및 댐퍼

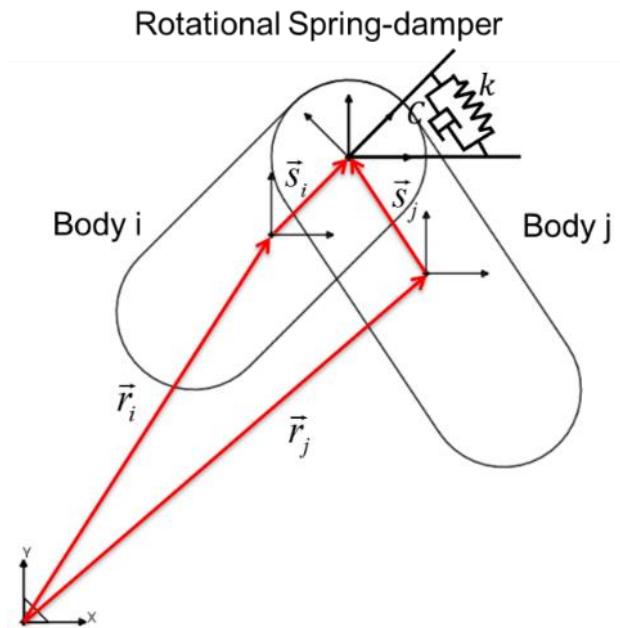


Figure 113 회전 스프링 및 댐퍼 힘 요소

위의 그림은 바디 i 와 바디 j 사이에 회전 스프링-댐퍼 힘 요소로 연결된 상태를 보여주는 그림이다. 회전 스프링-댐퍼는 두 물체 사이의 회전에 대해서 스프링의 강성과 감쇠력이 작용하여 회전 각도 변위에 대해서 초기 각도로 돌아오려는 복원력과 외력을 완충시키는 감쇠력이 작용하는 힘 요소이다. 이러한 두 바디 사이의 회전 각도 변위에 대한 회전 스프링의 토크 계산식과 바디 좌표에 대한 일반화 힘의 수식은 다음과 같이 유도된다. 회전 스프링에 의해 발생되는 토크 계산식은 스프링의 두 마커의 각도 θ , 각속도 $\dot{\theta}$, 스프링 강성 계수 k_r , 그리고 감쇠 계수 c_r 로 다음의 식으로 정의된다.

$$\tau_s = k_r (\theta - \theta_0) + c_r \dot{\theta} \quad \text{where, } \theta = \theta_i - \theta_j$$

회전 스프링-댐퍼의 토크 계산식에 의한 i 바디와 j 바디의 일반화 힘은 다음과 같은 식으로 정리되고 운동방정식의 외력항에 대입된다.

$$Q_\theta^i = -k_r (\theta - \theta_0) - c_r \dot{\theta}$$

$$Q_\theta^j = k_r (\theta - \theta_0) + c_r \dot{\theta}$$

(4) 회전 스프링의 생성방법

회전 스프링의 생성방법은 아래의 그림에서의 순서와 같이 회전 스프링 아이콘을 클릭

한 뒤, 생성 옵션을 고른 후 두 바디를 순서대로 선택하고, 회전 스프링이 생성될 포인트와 회전축을 입력하면 회전 스프링이 생성된다. 입력한 포인트에 Marker 두 개가 자동 생성되고 두 바디에 각각 하나씩 속하게 된다. 해석 중 이 두 Marker의 각도 변위를 측정하여 회전 스프링 토크를 계산하게 된다. 또한, 생성된 회전 스프링의 물성치 (Property) 대화로그를 열고 스프링의 강성 계수(Stiffness Coefficient), 감쇠 계수 (Damping Coefficient) 그리고 필요한 여타 파라미터를 수정하고 대화로그를 닫으면 해당 파라미터가 적용된 스프링 동역학 모델링을 해석 수행할 수 있게 된다.

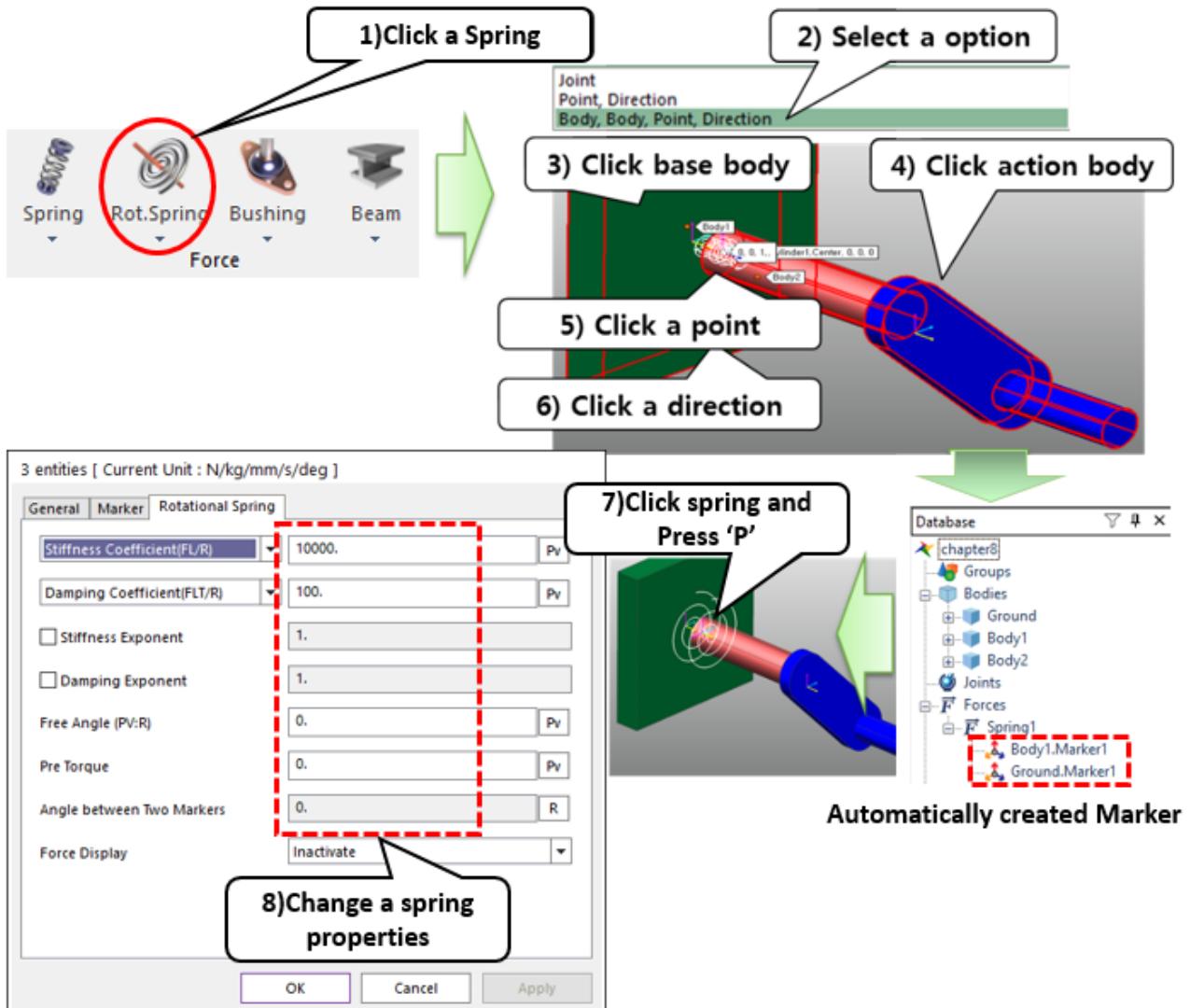


Figure 114 회전 스프링의 생성방법

3) Spline Curve를 이용한 비선형 스프링과 댐퍼 모델링

스프링의 Property 대화 창에서 입력한 강성 계수 값을 통하여 계산된 스프링 힘은 스프링의 길이 변화에 대한 강성 계수를 단순히 곱하여 스프링 힘을 계산하기 때문에 변위

와 힘의 관계식은 선형 관계로만 표현되는 제약이 있다. 하지만, 실제 시스템에 적용되는 많은 스프링에는 변위에 대해서 힘이 비선형적으로 작용하는 경우가 많다. 아래의 그림은 스프링의 길이 변화에 따라 강성이 바뀌는 대표적인 특성을 나타낸다.

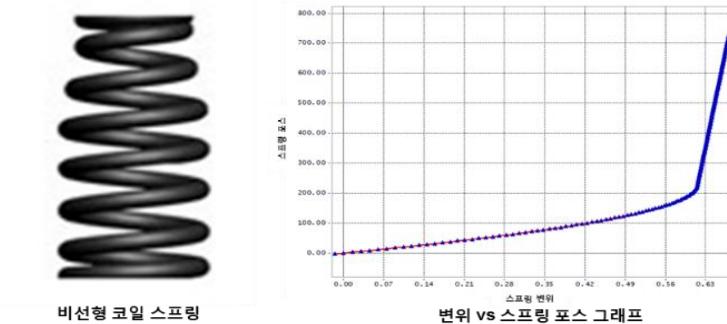


Figure 115 비선형 코일 스프링의 예

이러한 비선형 스프링을 생성하기 위해서는 스프링 변위에 대한 스프링 힘의 출력을 Spline 곡선을 이용하여 정의하고 스프링 Property 대화 창에서 강성 계수 입력 방식을 Spline으로 변경하고 Spline을 지정하면 비선형 스프링을 모델링 할 수 있다.

※ 비선형 스프링 생성방법

비선형 스프링의 Spline 곡선을 생성하는 방법은 다음의 순서와 같다

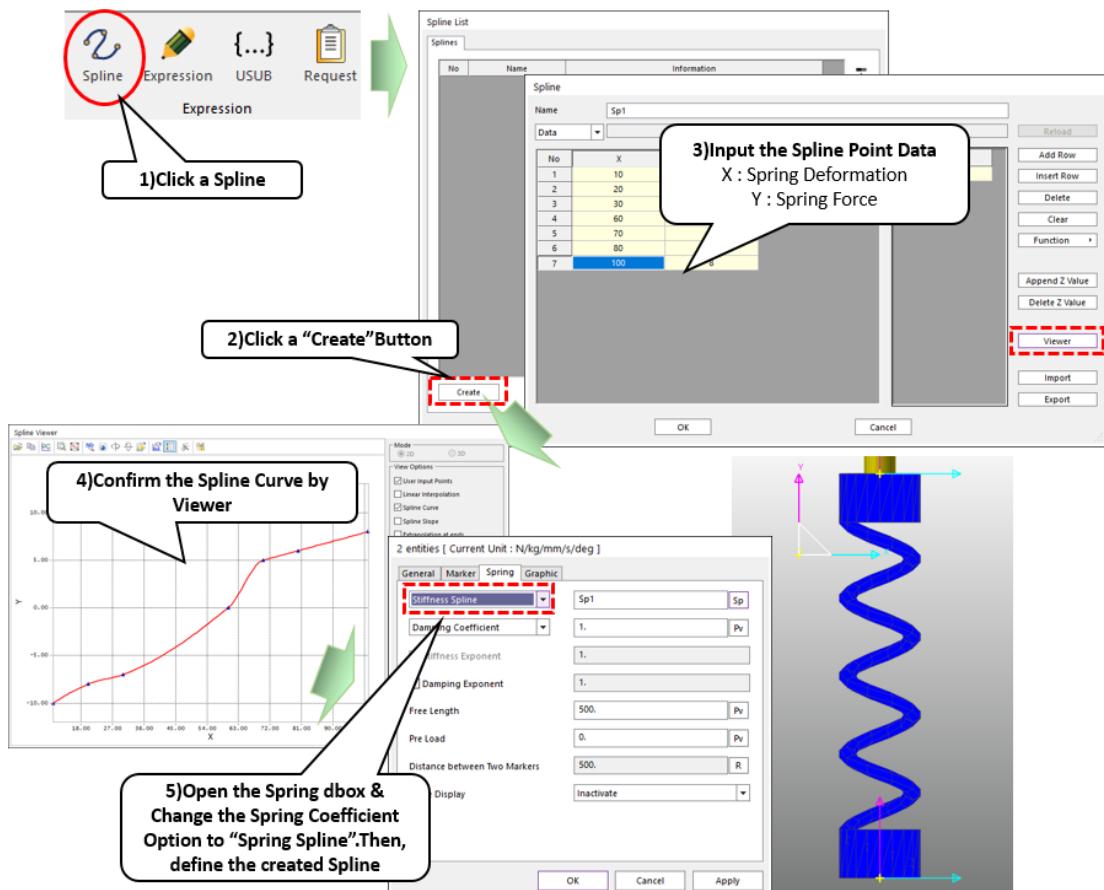


Figure 116 비선형 스프링 생성방법

* 비선형 스프링 해석 결과

비선형 스프링의 Spline 곡선을 사용하여 정의한 스프링을 가지고 해석을 수행하게 되면, 강성 특성이 Spline에 지정한 비선형 강성 특성을 그대로 반영하여 스프링 힘을 발생하고 다음과 같은 결과 그래프를 도출할 수 있다.

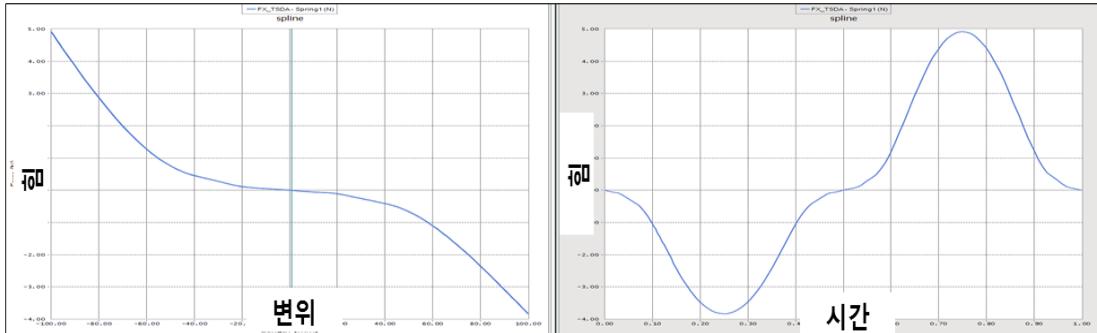


Figure 117 비선형 스프링의 해석 결과 그래프

2. 힘 요소의 종류

1) General Force

(1) Translational Spring Damper

병진 스프링은 가장 보편적으로 사용되는 힘 요소로써 스프링강의 둑근 강철 재료를 코일과 같이 감아서 만든 기계 요소를 말한다. 이와 같은 스프링은 외부에서 힘을 가해 형태를 변형시켰다가 그 힘을 제거했을 때 원래의 상태로 되돌아오는 탄성을 이용하여 에너지를 흡수하거나 저장할 수 있는 기계요소이다. 보통 자동차의 현가장치와 침대 매트리스 스프링 등에 널리 사용된다.

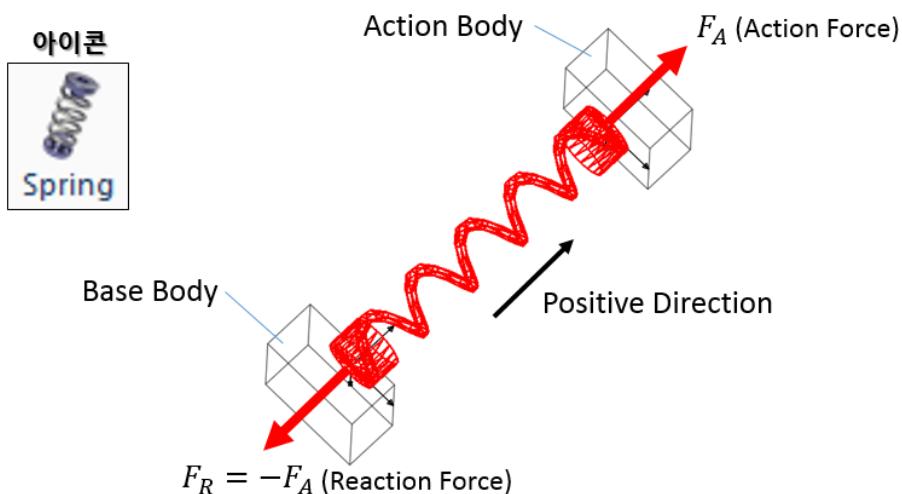


Figure 118 Translational Spring Damper Force

(2) Rotational Spring Damper

회전 스프링은 스프링 강을 나선형으로 감아서 만든 기계 요소이다. 또는 나사선형 스프링이라고도 한다. 감아서 탄성 에너지를 축적하고 풀리려고 하는 힘을 동력으로 이용한다.

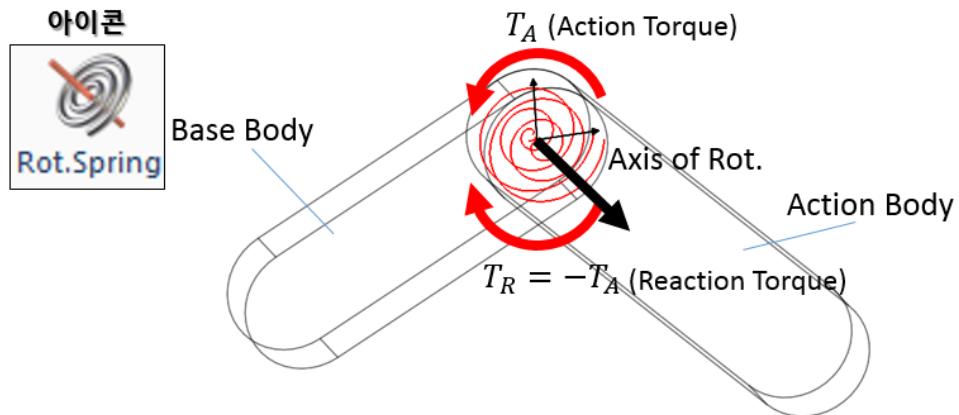


Figure 119 Rotational Spring Damper Force

(3) Axial Force

Axial Force는 두 물체의 두 점을 직선으로 잇고 각각의 점에 작용력과 반작용력을 시간에 대한 함수(수식)로 정의할 수 있는 힘 요소이다.

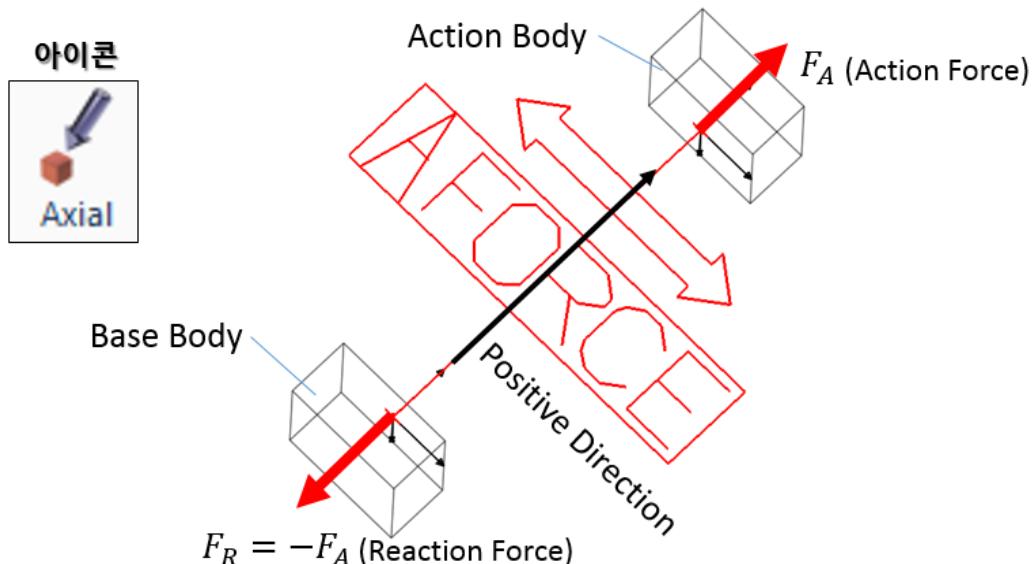


Figure 120 Axial Force

(4) Rotational Axial Force

Rotational Axial Force는 두 물체 사이에 정의한 회전축에 대하여 작용 토크와 반작용 토크를 시간에 대한 함수(수식)로 정의할 수 있는 힘(토크) 요소이다.

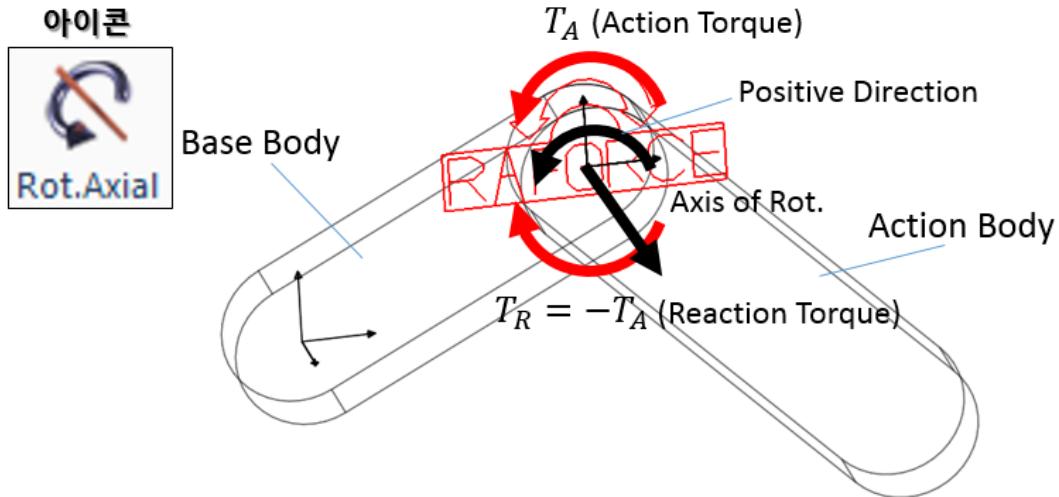


Figure 121 Rotational Axial Force

(5) Translational Force

Translational Force는 정의한 바디에 3개의 병진 방향 X, Y, Z축에 대해서 각각의 힘을 시간에 대한 함수(수식)으로 정의할 수 있는 힘 요소이다. 또한, 힘의 작용 방향에 대한 Reference Frame을 사용자가 수정할 수 있기 때문에, 바디가 움직이는 것을 고려하여 힘을 작용 시킬 수 있다.

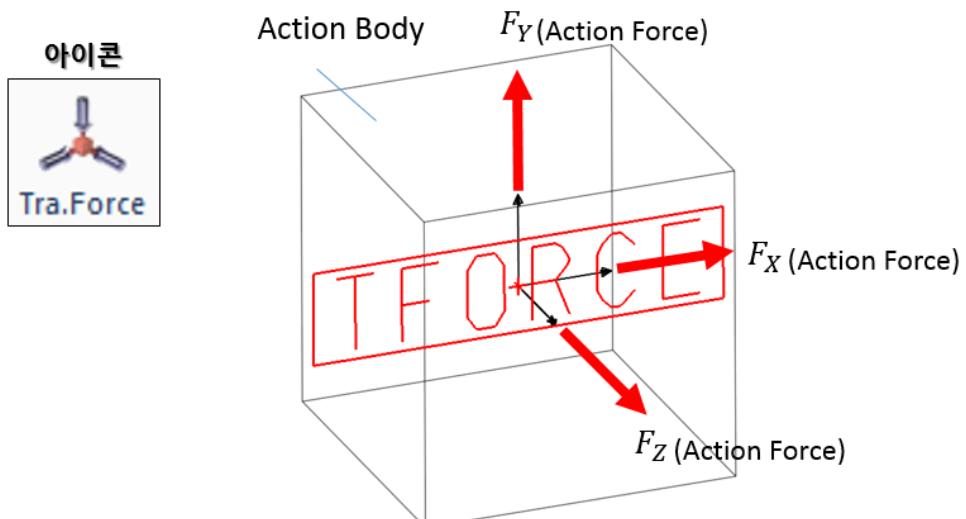


Figure 122 Translational Force

(6) Rotational Force

Rotational Force는 정의한 바디에 3개의 회전 축에 대해서 각각의 토크를 시간에 대한 함수(수식)으로 정의할 수 있는 힘(토크) 요소이다.

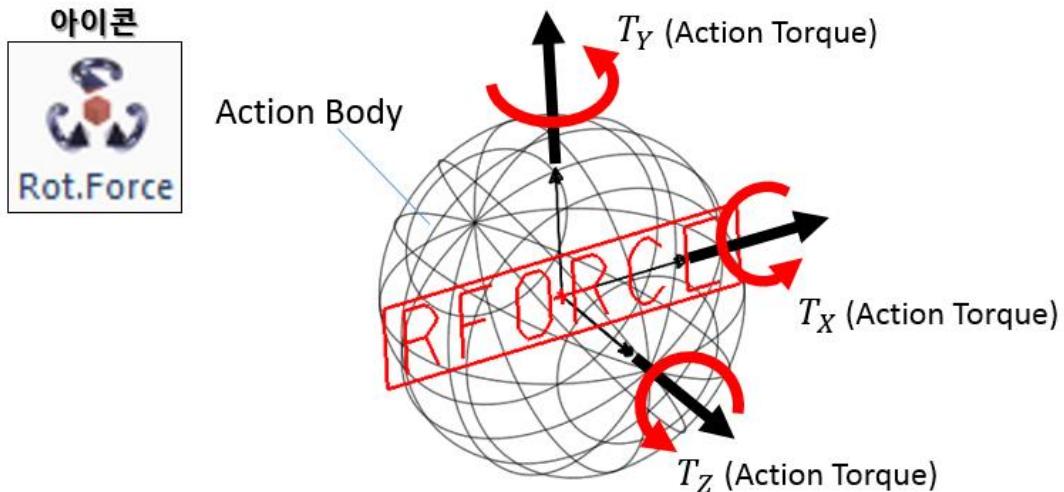


Figure 123 Rotational Force

(7) Screw Force

Screw Force는 바디에 3개의 병진 방향과 3개의 회전축에 대해서 시간에 대한 함수(수식)으로 병진 힘과 토크를 정의할 수 있는 힘 요소이다.

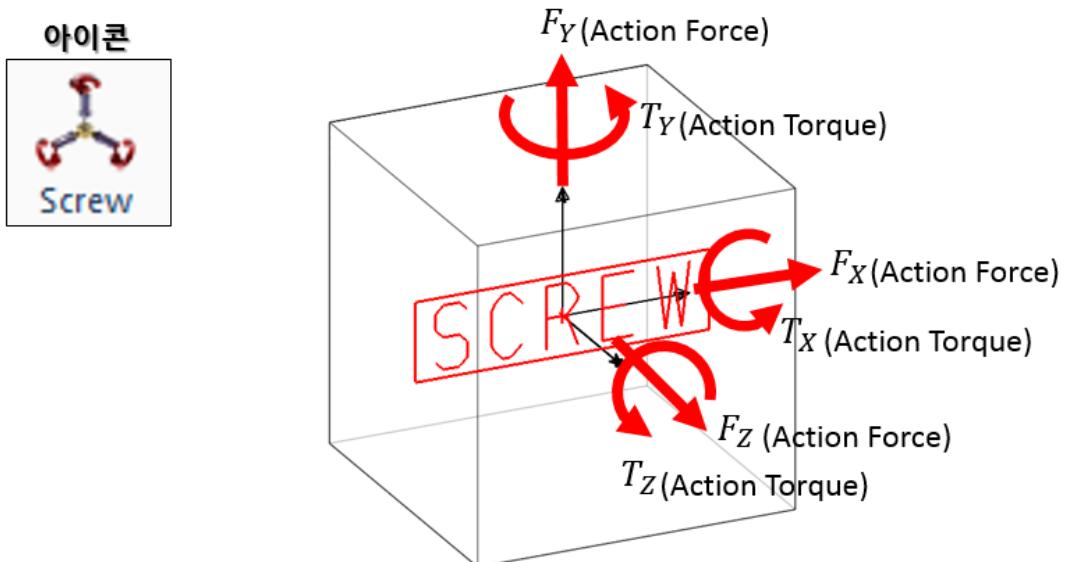


Figure 124 Screw Force

(8) Bushing Force

Bushing Force는 정의한 위치에 6개의 모든 자유도 방향으로 병진/회전 스프링과 댐퍼가 생성된 것과 같은 힘 요소로써, 두 물체를 한 점에 힘으로 붙여 놓은 효과를 볼 수 있는 힘 요소이다

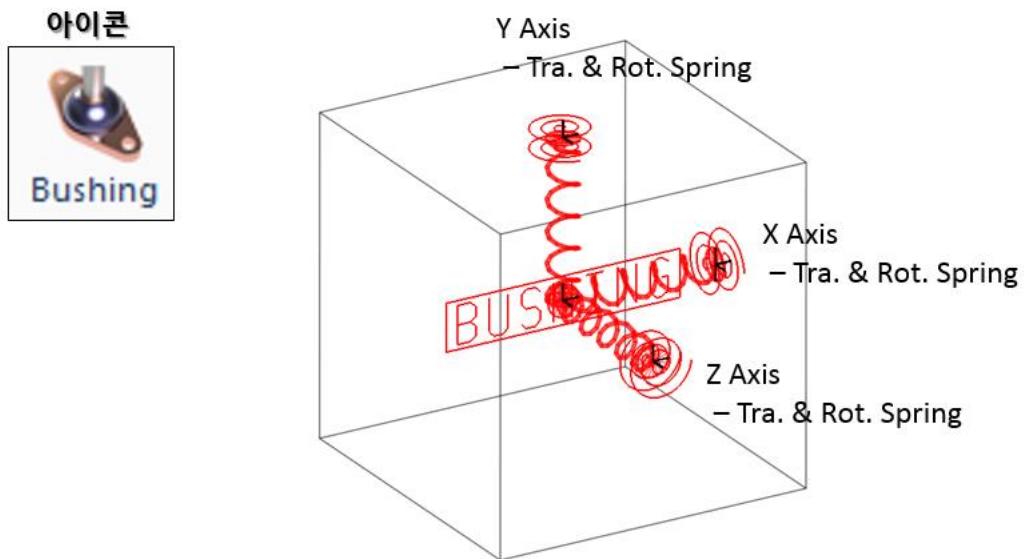


Figure 125 Bushing Force

2) Special Force

(1) Matrix Force

Matrix Force는 정의한 두 바디 사이의 힘 요소에 강성 행렬을 사용자가 직접 정의하여 사용할 수 있는 힘 요소이다. 이러한 특성으로 사용자는 Matrix Force를 원하는 종류의 힘 요소로 사용할 수 있다. 예를 들면, 베어링 모델을 6축에 대한 강성 행렬로 구한 후 Matrix Force의 강성 행렬에 입력하여 베어링의 특성을 갖는 강성 힘 요소로 모델링하는 등 여러 종류의 힘 요소를 생성해 낼 수 있다.

(2) Beam Force

Beam Force는 두 바디 사이에 Beam의 힘에 관한 수식을 적용하여 마치 두 바디 사이의 거동을 Beam과 같은 거동을 할 수 있게 하는 힘 요소이다. 이를 위해, 사용자는 Young's modulus, Shear modulus와 Beam 단면에 대한 형상 정보와 단면 2차 모멘트에 대한 정보를 입력하여 Beam 대하여 해석을 수행한다.

(3) Plate Force

Plate Force는 네 바디를 마치 박판(Shell)과 같은 거동을 위한 힘의 수식을 적용한 힘 요소이다. 이를 위해, 사용자는 Young's modulus, Poisson Ratio, Thickness 등의 정보를 입력해야만 한다.

(4) Tire Force

Tire Force는 자동차의 타이어 동적 거동을 모사하기 위한 타이어 수식이 내장된 힘의 요소이다. 현재 널리 사용되고 있는 Fiala, UA 타이어 수식 모델이 지원되며 사용자가 직접 수식을 정의할 수 있는 User 타이어가 지원된다.

3. 힘 요소의 생성방법 및 속성 변경 방법

1) 힘 요소 생성방법

힘 요소를 생성하는 일반적인 방법은 연결할 두 바디와 연결위치를 정의하는 것이다. RecurDyn은 힘 요소 생성시 몇 가지 생성 옵션을 제공하는데 기본적으로 “Body, Body, Point, Point” 옵션을 통하여 연결한 바디와 연결위치를 입력하여 생성하는 방식이 사용된다.

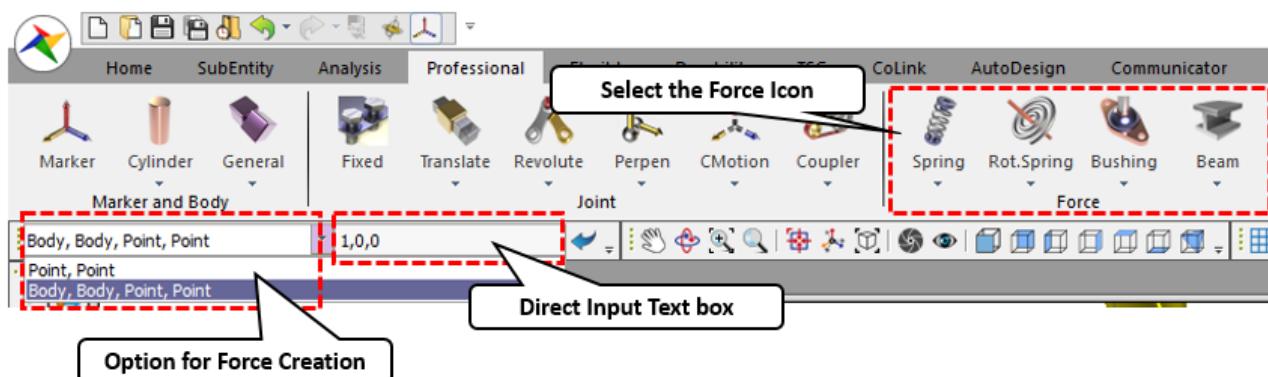


Figure 126 힘 요소 생성 옵션

- Point, Point: Working Window에서 Point를 선택하면 해당위치에 있는 Body를 자동으로 Action과 Base Body로 선택하고 Point와 Point를 연결하는 선을 힘 요소의 벡터로 힘 요소가 생성된다.
- Body, Body, Point, Point : Action Body와 Base Body를 직접 선택하고 Point와 Point를 연결하는 선을 힘 요소의 벡터로 힘 요소가 생성된다.

Direct Input Text Box는 Point를 선택할 때 사용자가 직접 좌표를 입력할 수 있는 기능을 제공한다. 사용법은 해당 작업순간에 작업창에서 Point를 선택하는 대신에 직접 TextBox에 값을 입력하고 키보드 <Enter> 버튼을 누르면 입력 작업이 완료된다.

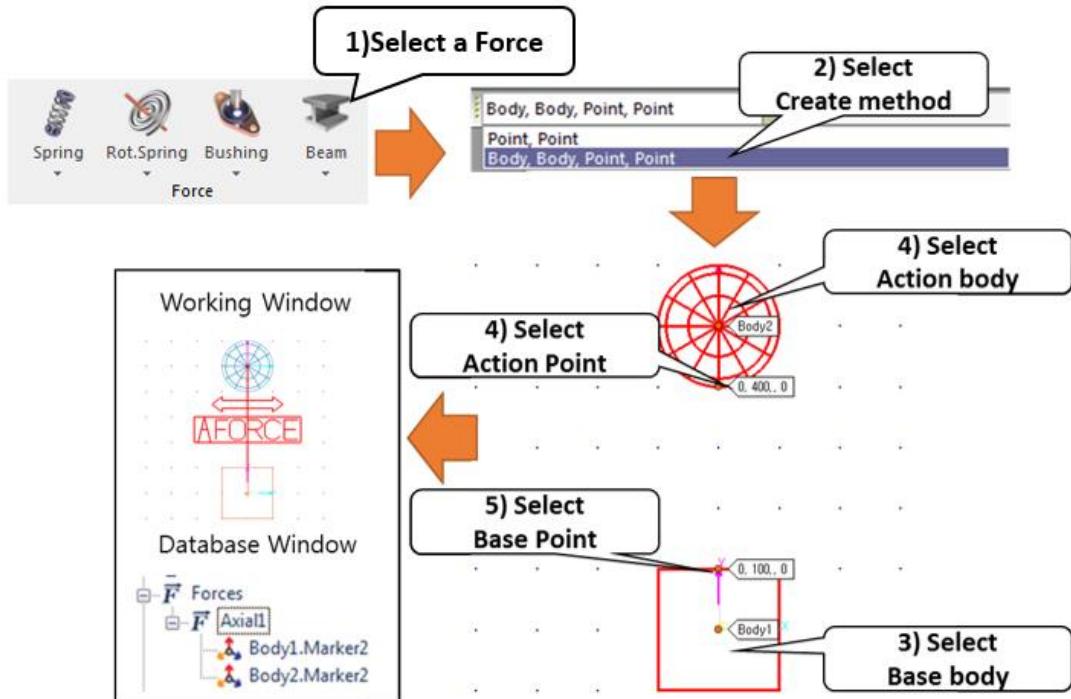


Figure 127 힘 요소 생성 방법

2) 힘 요소의 설정 및 이동

힘 요소의 위치와 자세를 수정하는 방법은 두 가지가 있다. 첫 번째는 힘 요소의 Property 대화 창에서 직접 Location과 Orientation 값을 조정하는 방법이며, 두 번째는 Object Control을 이용하여 수정하는 방법이다. 두 가지 방법 모두 효과적이지만 Location과 Orientation을 직접 입력하는 방법이 좀 더 명확한 입력방법이라 할 수 있다.

(1) 힘 요소 직접 수정 방법

힘 요소의 Property 대화 창을 열어 직접 좌표와 자세를 입력하는 방법으로서 작업 창의 힘 요소를 선택 후 키보드 <P> 버튼을 누르거나 마우스 오른쪽 버튼을 눌러 Property 메뉴를 선택하여 Property 대화 창을 열어 수정한다.

Property 대화 창에서 수정하는 방법은 사용자가 직접 좌표를 입력할 수 있으며, 작업 창상에서 Point를 선택하여 입력할 수 있다.

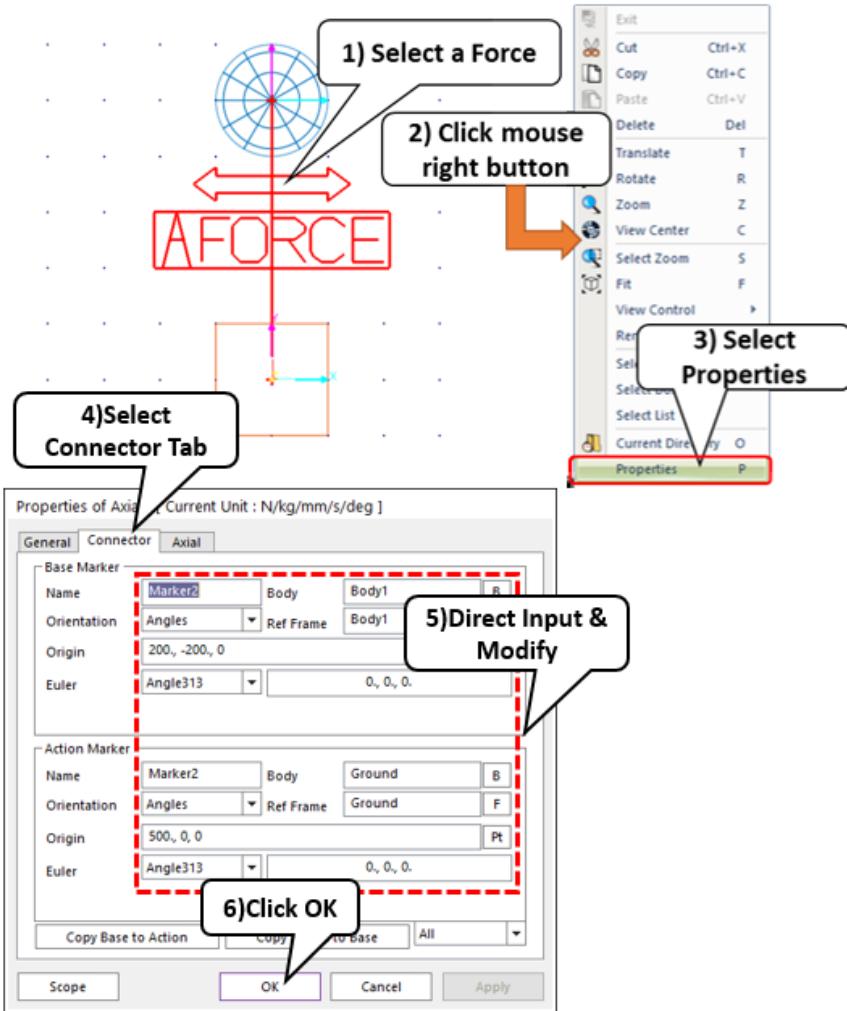


Figure 128 힘 요소 Property 대화 창을 이용한 직접 수정 방법 및 순서

힘 요소의 위치와 자세를 수정하기 위해 Base Marker와 Action Marker 모두 수정해야 한다. 이때 편리하게 수행할 수 있는 기능이 Copy Base to Action이나 Copy Action to Base 버튼이다.

- Copy Base to Action : Base Marker의 좌표와 자세를 Action Marker로 Copy 하는 기능
- Copy Action to Base : Action Marker의 좌표와 자세를 Base Marker로 Copy 하는 기능

Copy 기능을 사용할 때 단순히 수치만 복사하는 것이 아니라 Global 관점에서 동일한 위치와 자세가 되도록 Body Coordinate에 대한 좌표와 자세로 바꾸는 작용을 하기 때문에 이 기능을 사용한 후, Action Marker와 Base Marker의 Text Box에 입력된 내용이 서로 다를 수 있다. 그러나 이는 정상적인 입력결과이다.

(2) Object Control을 이용하는 방법

앞서 설명한 Object Control의 기능을 이용하는 방법으로서 Joint가 참고하고 있는 두 Marker를 Object Control Entity로 선택한 후 이동 및 회전시키는 방법이다. 이 방법에서 가장 중요한 Point는 Control Object로 Joint를 선택하는 것이 아니라 Joint의 Action Marker와 Base Marker를 선택하는 것이다. Joint만 선택하고 Object Control을 수행하면 Joint에는 아무런 변화가 나타나지 않을 수 있다.

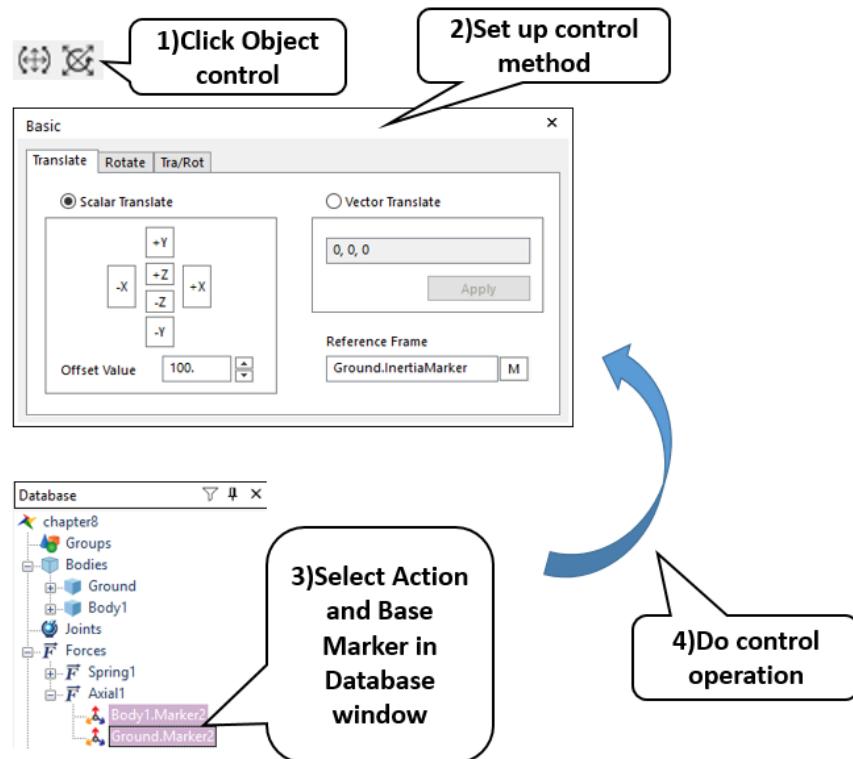


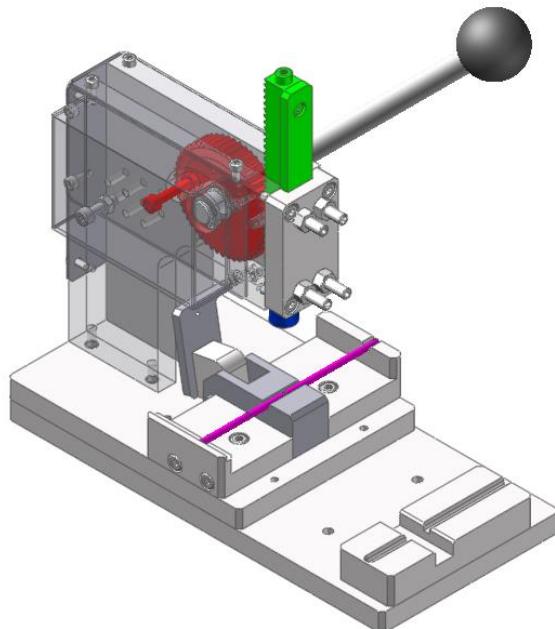
Figure 129 Object Control을 이용한 힘 요소 수정 및 수정 방법

Workshop 8 Handpress

내용: Translational Spring-Damper Force를 이용해서 핸드 프레스 레버의 프레싱 작업 후 원위치로 복귀하는 시스템을 모델링하여 레버의 원위치 복귀 시 필요한 힘의 크기와 필요한 스프링의 강성 계수를 분석한다

본 워크샵을 통해 아래의 관련 기능을 익힐 수 있다.

- Translational Spring-Damper Force 생성방법
- Rotational Spring-Damper Force 생성방법
- Spline을 이용한 비선형 스프링 생성방법



수행시간	40분
난이도 Level	2

Workshop 수행을 위해 필요한 사항

- RecurDyn Professional
- Workshop에서 제공하는 CAD파일

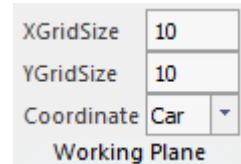
STEP 1 핸드 프레스 바디 모델링

1. New Model 실행 → ‘Hand_Press_Machine’이라는 이름으로 새로운 모델을 생성

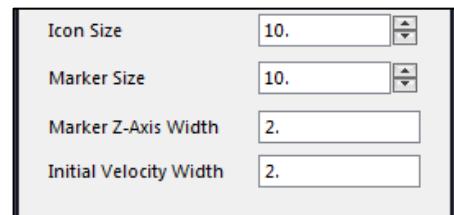
- Name: Hand_Press_Machine
- Unit: MMKS
- Gravity: -Y

2. Home Tab의 Working Plane에서 XGridSize와 YGridSize

모두 10으로 변경하고, Icon Control  를 클릭하여

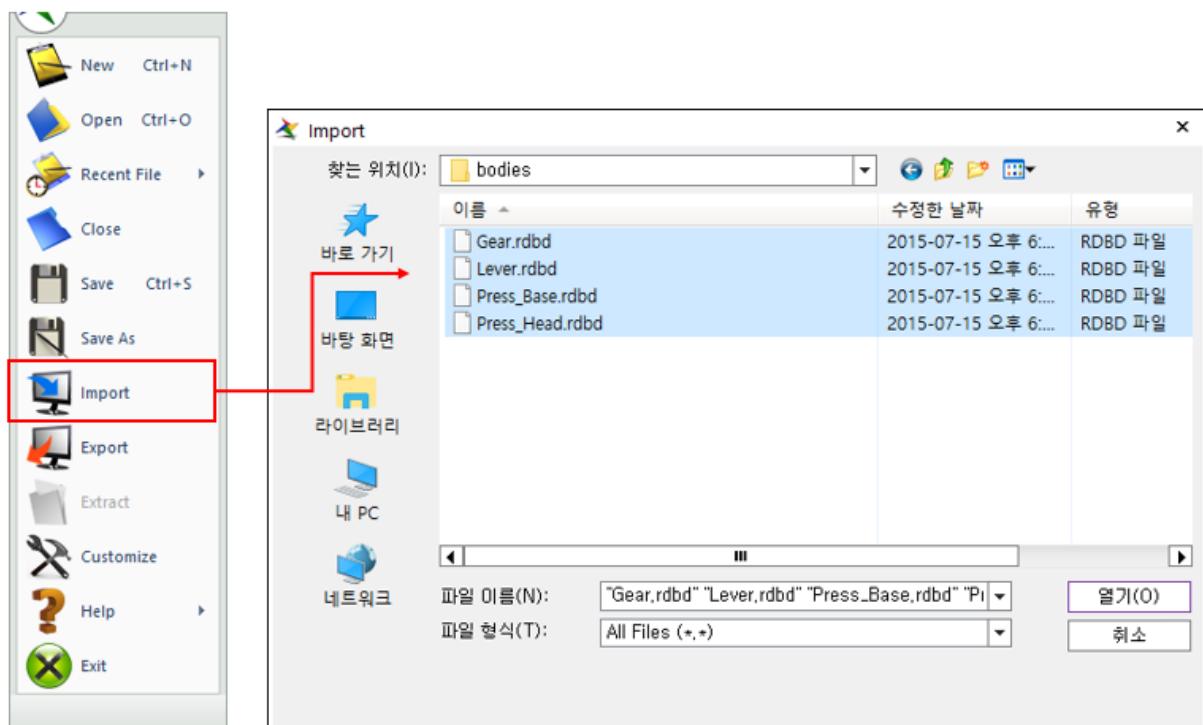


Icon Size와 Marker Size를 모두 10으로 변경한다.



3. System Button  을 눌러 Import  실행, 제공되는 Gear.rdbd,

Lever.rdbd, Press_Base.rdbd, Press_Head.rdbd 파일을 다중 선택 후, 열기 버튼 클릭



STEP 2 조인트 모델링

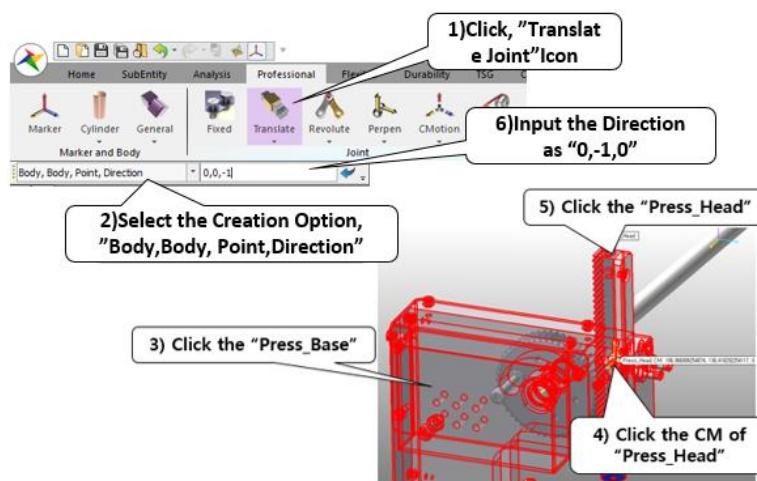
1. Professional Tab의 Joint Menu의 Fixed Joint 버튼을 누른 후 아래의 순서로 클릭:

Ground → Press_Base Body → (0,0,0)

2. Professional Tab의 Joint Menu의 Translate Joint 버튼을 누른 후 생성 옵션을

“Body, Body, Point, Direction”으로 선택 후, 다음의 순서로 클릭:

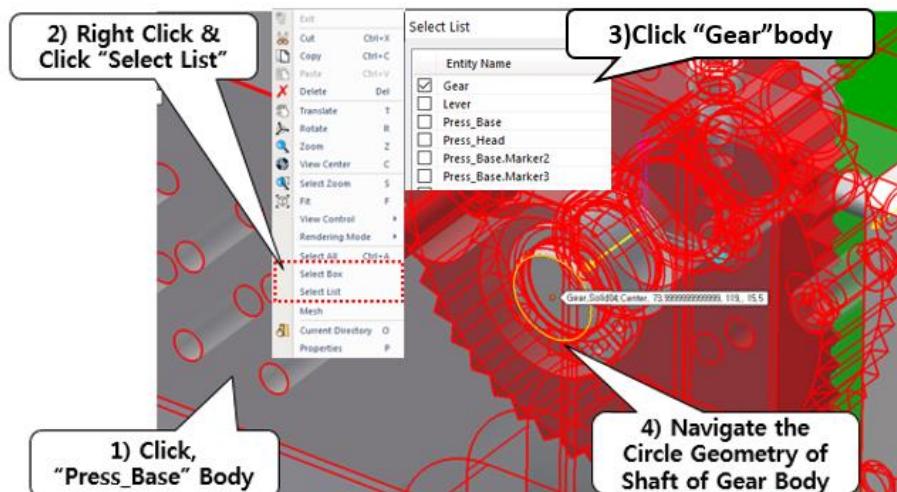
Press_Base Body → Press_Head Body → Press_Head의 CM 마커 → (0,1,0) 입력



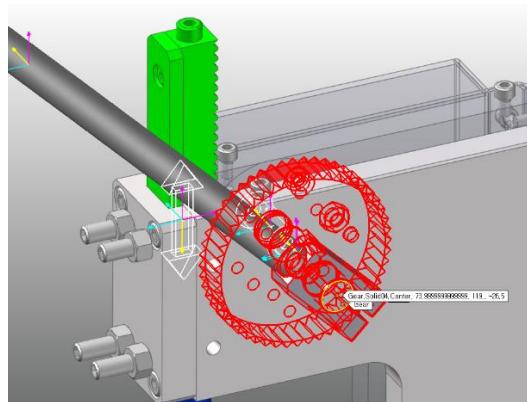
3. Professional Tab의 Joint Menu에서 Revolute Joint 버튼을 누른 후, 생성 옵션을

“Body, Body, Point”로 선택 후, 다음의 순서대로 클릭:

Press_Base Body → Gear Body(Select Box or List를 이용) → Gear Body에 포함되어 있는 축 형상 중 Circle Geometry를 선택(또는, (74, 119, 15.5)를 직접 입력)

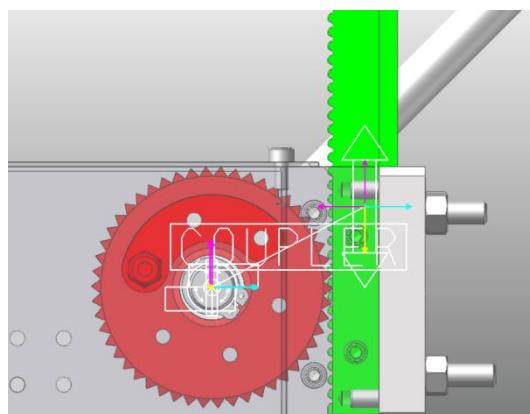


4. Lever 바디와 Gear 바디의 고정을 위해 Fixed Joint를 생성한다. 먼저, 두 바디가 화면에 잘 보이도록 화면을 회전시킨다. Professional Tab의 Joint Menu의 Fixed Joint  버튼을 누른 후, 다음의 순서대로 클릭:
Gear Body → Lever Body → Gear 축 형상의 맨 끝 Circle형상(또는 조인트 좌표 (74, 119, -26.5)를 직접 입력)



5. Gear와 Press Head는 랙기어 메커니즘이 적용되어 있다. 따라서, 기어와 Head의 치형이 맞물려 Press Head가 상하 움직임을 갖게 되는데, 이러한 랙기어 모델을 Coupler Joint를 이용하여 기어의 회전각도 대비 Translate Joint의 이동거리에 대해서 구속 조건으로 모델링 한다.

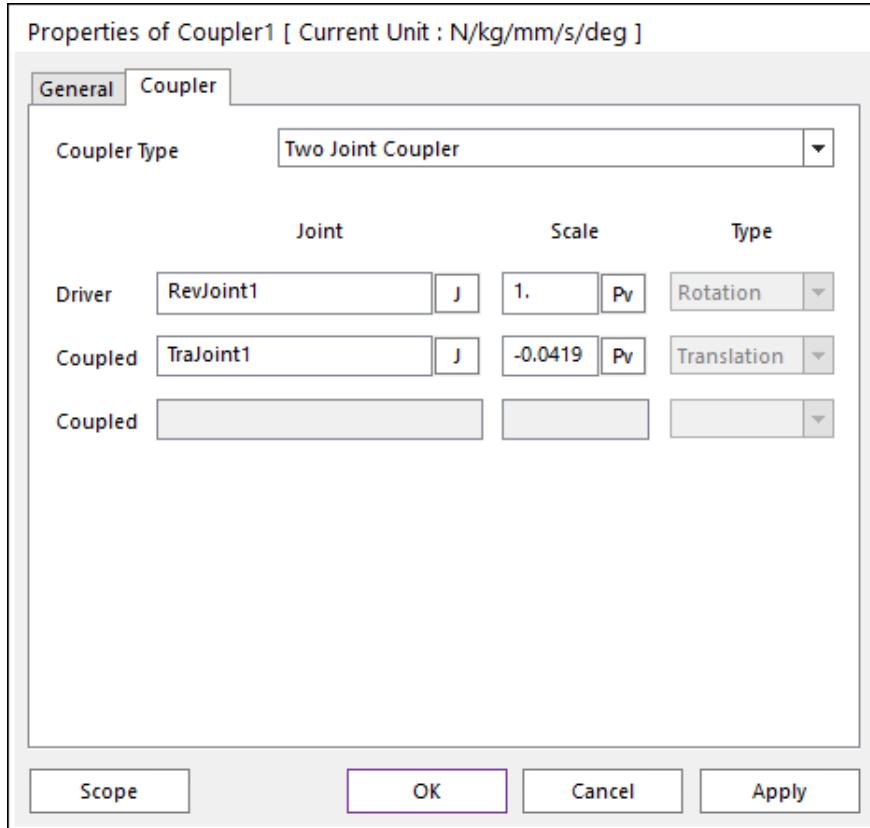
6. Professional Tab의 Joint Menu에서 Coupler  버튼을 누른 후, 다음의 순서대로 클릭: Revolute Joint → Translate Joint



7. Coupler 조인트를 클릭하고, P 버튼을 눌러 Property 창을 열고, Scale을 다음과 같이 설정 한다.

- Driver : RevJoint1 : Scale = 1
- Coupled : TraJoint1 : Scale = -0.0419

이 모델에서 기어는 총 50개의 이빨을 갖고 있으므로 기어이 하나당 각도 변위는 7.2도 (0.1257rad)이다. 그리고 이빨 하나당 Rack Gear는 3mm 움직인다. 따라서 비율을 계산하면 $0.1257/3$ 이 되며 이 값은 0.0419이다. 조인트의 회전 방향에 따라 -부호를 붙여야 하며, 본 모델에는 음의 값이 필요하다.



STEP 3 Force 생성 모델링

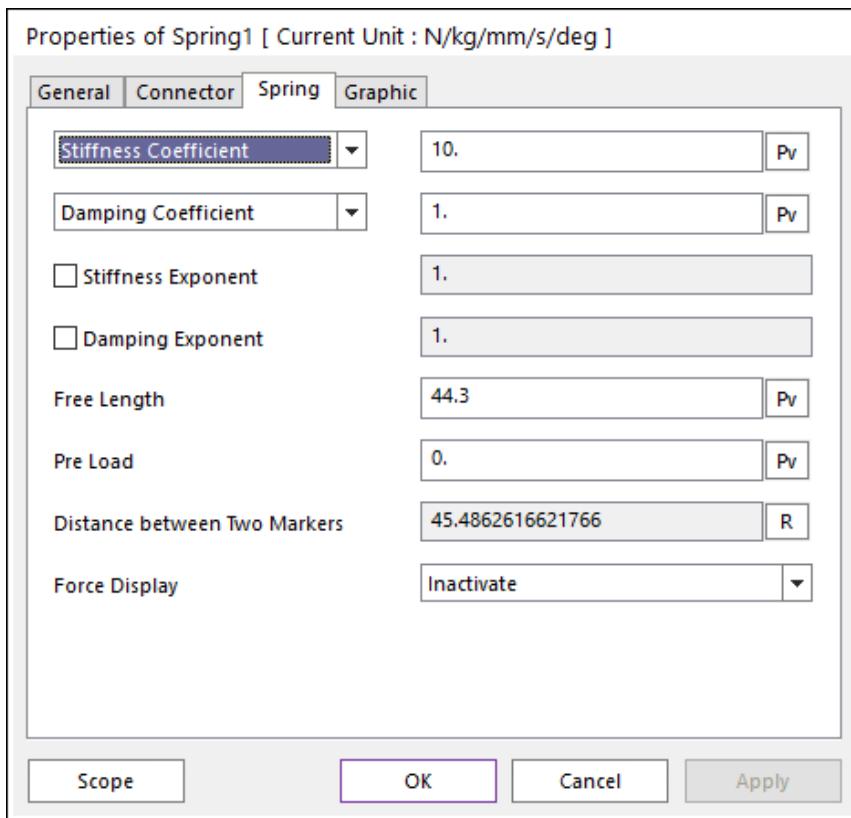
1. Lever를 누름으로써 Press Head가 내려오면서 작업을 하게 되고, 작업 후 원위치로 복귀시키기 위한 복귀 스프링을 다음의 과정을 통하여 Spring 요소를 모델링 한다. Professional

Tab의 Force Menu에서 Spring  버튼을 누르고 다음의 순서대로 클릭:

Press_Base → Gear(Select Box/List이용) → (22, 98, 22) 입력 → (60, 123, 22) 입력

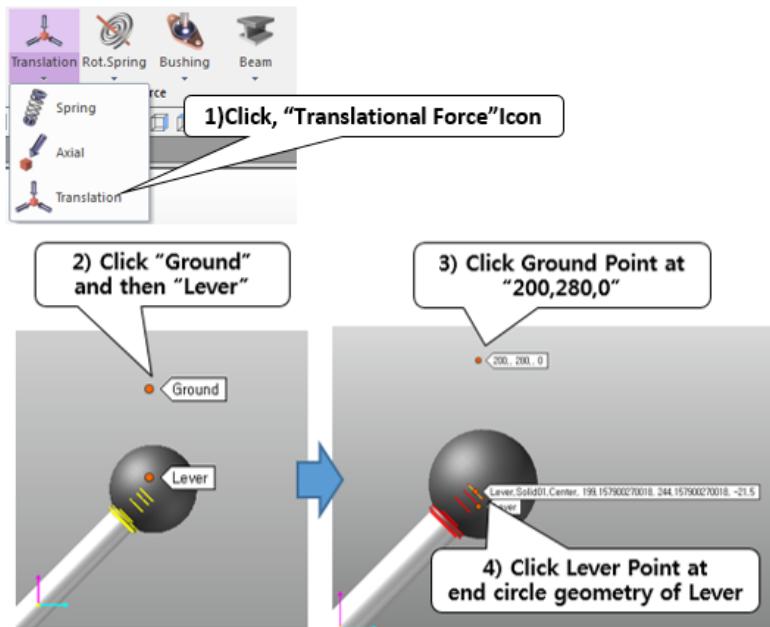
2. Database에서 Spring1을 클릭한 후, P 버튼을 눌러 Spring 대화 창을 연다. 다음 그림과 같이 Spring의 물성값을 변경하고 OK눌러 닫는다.

- Spring Coefficient : 10.0
- Damping Coefficient : 1.0
- Free Length : 44.3



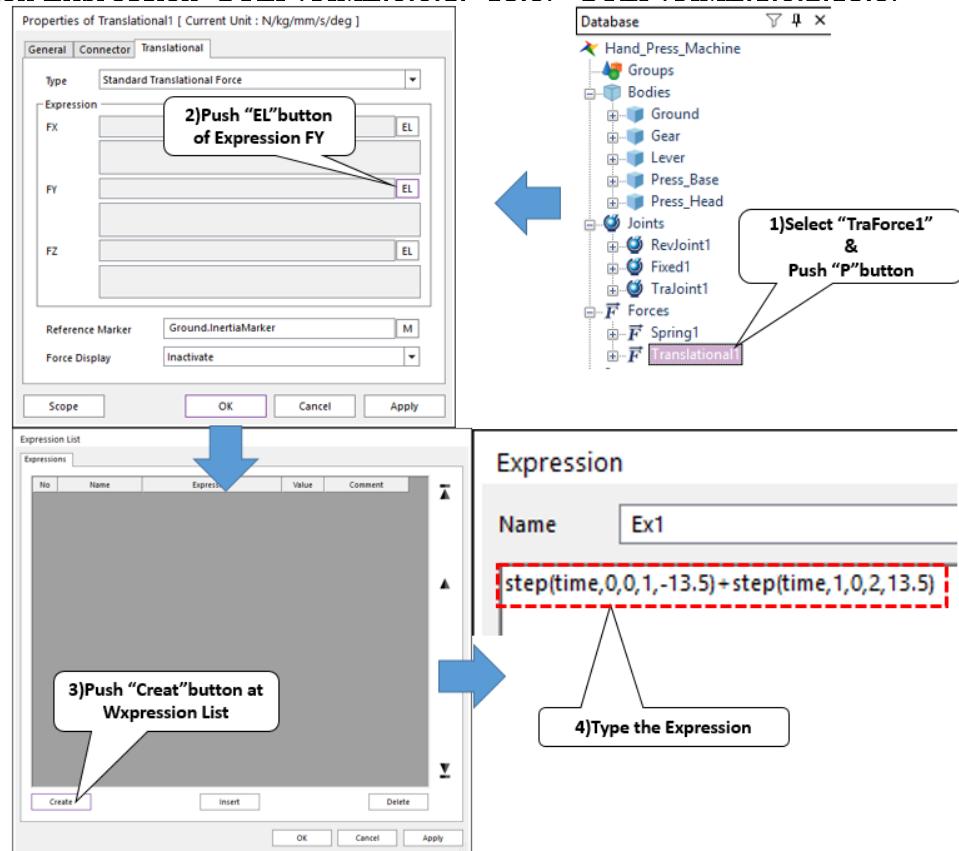
3. Lever을 누르는 힘을 생성하기 위해서 힘 요소 중 Translational Force를 이용하여 다음의 순서와 같이 Lever를 누르는 힘을 생성한다. Professional Tab의 Force Menu에서 Translational Force 버튼을 누른 후, 다음의 순서대로 클릭:

Ground → Lever → (200,280,0) 클릭 → Lever 끝단의 Circle Geometry를 클릭



4. Translational Force 생성 후, Translational1 Force 요소를 클릭한 후 ‘P’ 버튼을 눌러서 Translational1의 대화창을 열고, Function Expression으로 시간에 대한 힘의 입력 함수를 다음의 순서와 같이 생성한다.

- Function Expression: STEP(TIME.0.0.1.-13.5)+STEP(TIME.1.0.2.13.5)



5. Expression의 입력이 완료되면, Expression 창과 Expression List 창의 OK 버튼을 눌러 입력을 완료한다.

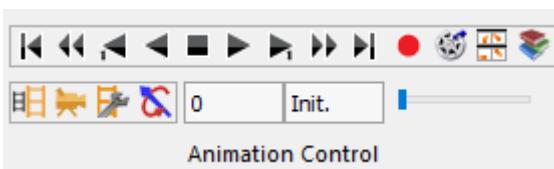
STEP 4 시뮬레이션 수행 및 Spring 힘과 변형 PLOT

1. Dynamic Simulation 버튼 을 누름 → Dynamic/Kinematic Analysis 창이 열림

2. End Time에 2를 입력하고 Step은 200을 입력 후 Simulate 버튼을 누름

- End Time: 2
- Step: 200

3. 아래 그림과 같이 Analysis > Animation Control > Play 아이콘 등의 메뉴를 이용하여 모델의 작동 상태를 동영상으로 확인해 본다.



4. Analysis Tab > Plot 메뉴 > Plot_Result 버튼을 눌러 Plow window을 실행함



5. Window 버튼



의 하단에 있는 화살표를 누르고



All 메뉴를 선택하여 Plot

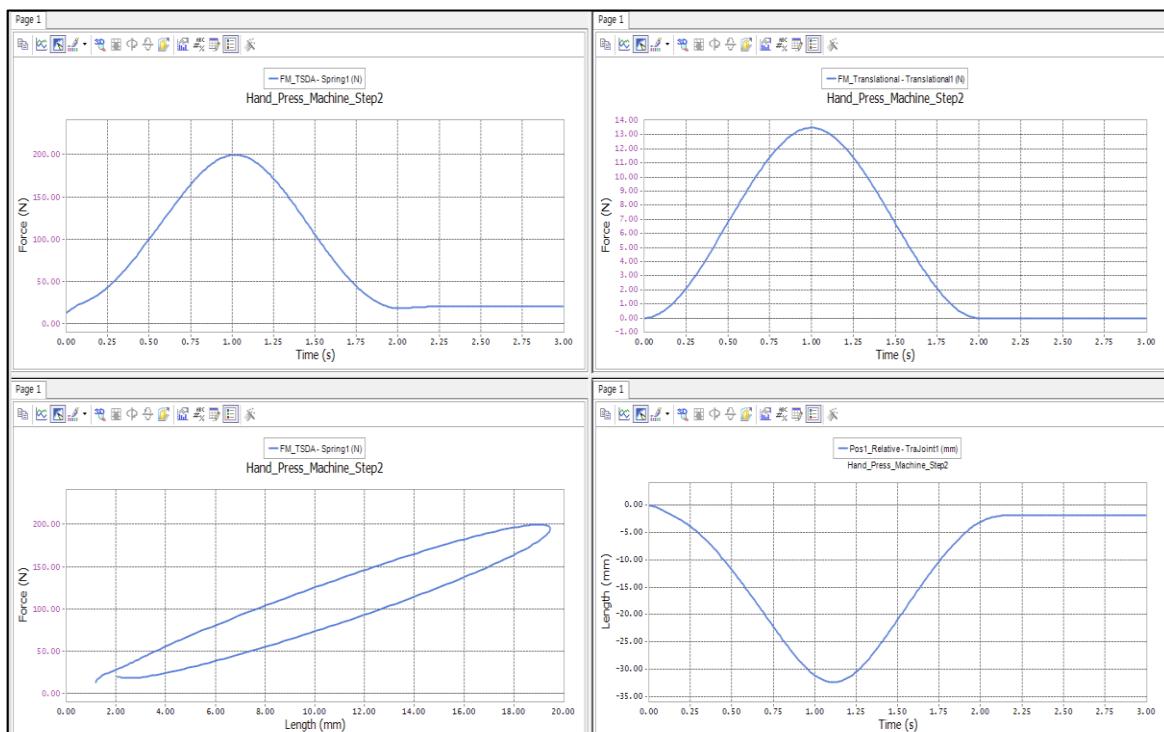
Window의 창이 4개로 분할되도록 설정

6. 좌측 상단의 창을 마우스로 눌러 선택하고 Plot database창에서 Force/Translational Spring Damper/Spring1/FM_TSDA를 더블클릭하여 그래프를 그려서, Spring 작용력을 확인 및 분석한다.

7. 우측 상단의 창을 마우스로 눌러 선택하고 Plot database창에서 Force/Translational Force/Translational1/FM_Translational을 더블 클릭하여 그래프를 그려서, Lever를 누르는 힘이 입력한 함수와 같은지 확인한다.

8. 좌측 하단의 창을 마우스로 눌러 선택하고 Plot database창의 하단에 있는 X Axis X Tab을 선택 후 Force/Translational Spring Damper/Spring1/DEFL_TSDA를 클릭한다. 다음, Plot Database 창의 하단에 있는 Y Axis Y Tab을 선택 후 Force/Translational Spring Damper/Spring1/FM_TSDA를 더블클릭하여 스프링의 변형량 대 Spring 작용력에 대한 그래프를 그려서 Stiffness가 입력한 10의 값이 도출되는지 확인 및 분석해보자.

9. 우측 하단의 창을 마우스로 눌러 선택하고 Plot database창의 하단에 있는 X Axis X Tab을 선택 후 다시 Time을 선택한다. 다음, Plot Database창의 하단에 있는 Y Axis Y Tab을 선택 후 Joints/TraJoint1/Pos1_Relative를 더블클릭하여 Head의 이동 거리에 관한 그래프를 그려본다.



STEP 5 Spline을 이용한 Spring Coefficient 정의

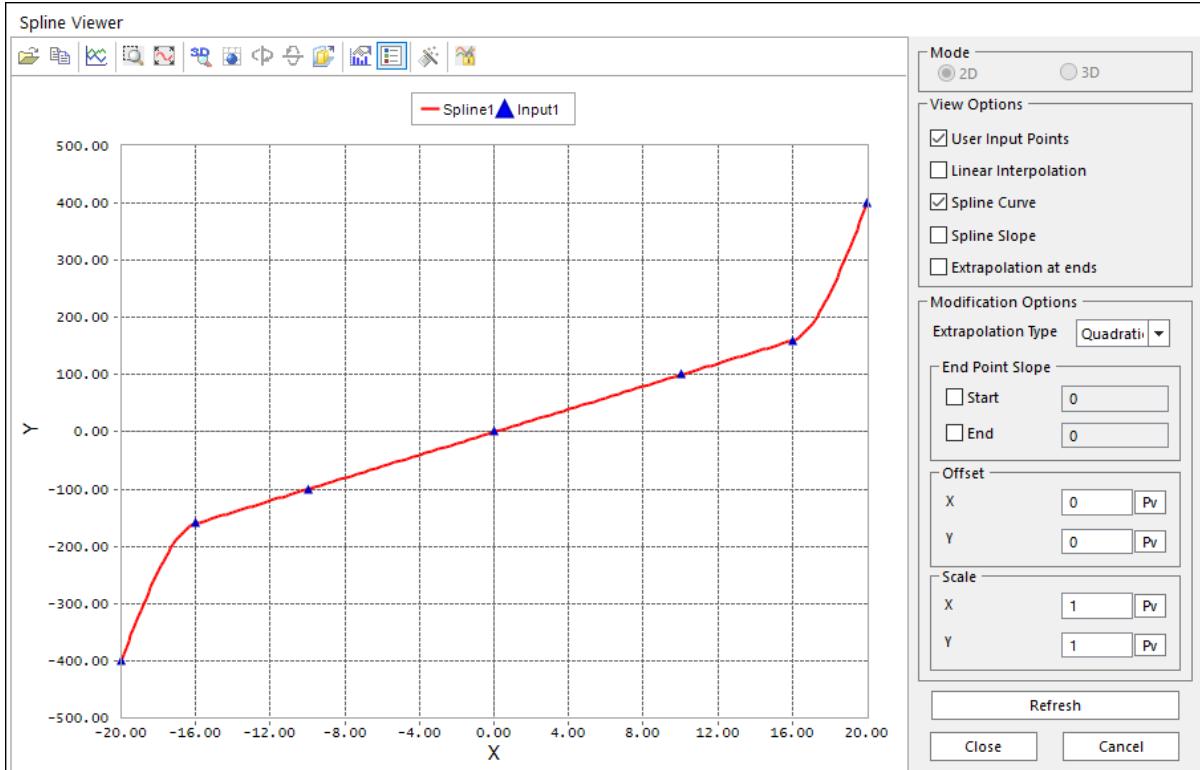
1. “Hand_Press_Machine.rdyn” Tab를 눌러 Plot 작업창에서 Pre-processor로 화면을 전환한다.

2. SubEntity Tab의 Expression Menu의 Spline 아이콘을 클릭한다. Spline List 대화 창이 뜨면, 다시 “Create” 버튼을 눌러 Spline 생성 대화 창을 연다.

3. Spline 생성 창에서 “Add Row” 버튼을 7번 누른다(7개의 입력 행이 생겨야 한다). 7개의 입력 행에 다음과 같이 X, Y1 데이터를 입력한다.

Spline		
Name	Sp1	
Data		
No	X	Y1
1	-20	-400
2	-16	-160
3	-10	-100
4	0	0
5	10	100
6	16	160
7	20	400

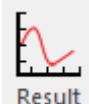
4. “Viewer” 버튼을 눌러 입력한 데이터의 그래프가 정확히 입력되었는지 다음과 같이 확인한다.



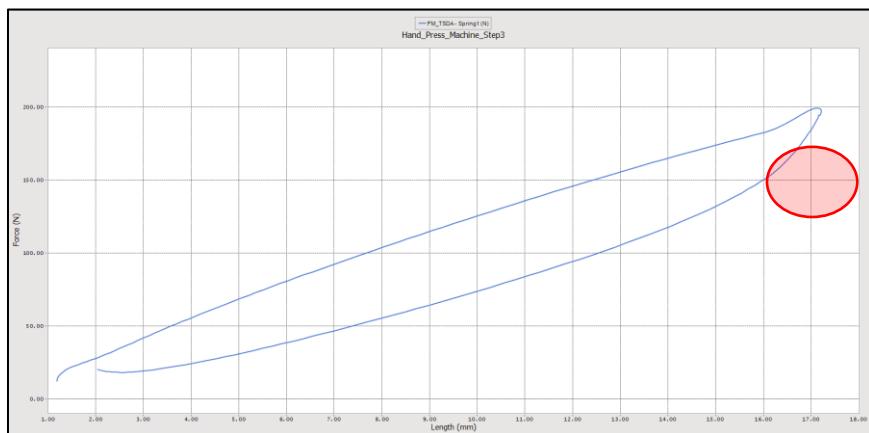
※ 위와 같은 Spline 스프링 생성방법은 실제 스프링을 변형하여 얻은 스프링력의 결과 데이터를 입력하여 실제 스프링의 특성을 갖는 Spring 모델을 생성하여 시뮬레이션을 할 수 있다. 본 Workshop에서는 Head Press Machine에서 Lever를 과도하게 내리려고 할 때 보다 강한 스프링력이 작용하여 그러한 과도한 동작에 대해서 대비할 수 있는 스프링 모델을 생성해서 그 결과를 시뮬레이션으로 확인할 수 있다.

5. Spline 대화창의 OK 버튼과 Spline List 대화창의 OK 버튼을 눌러 완료한다.
6. Database에서 Spring1을 클릭한 뒤, “P” 버튼을 눌러 Spring1의 대화창을 연다.
7. Spring 옵션을 클릭한 뒤, Stiffness Coefficient에서 Spring Spline으로 옵션을 변경한다.
8. 우측의 “Sp” 버튼을 클릭하여 연결된 Spline List 대화 창을 연다. 위에서 생성한 Sp1을 선택하고 OK 버튼을 누른다. Spring1의 대화 창에서도 OK 버튼을 눌러 입력을 완료한다.

9. Dynamic Simulation 버튼  을 누름 → Dynamic/Kinematic Analysis 창이 열림 → “Simulate” 버튼을 누름

10. Plot_Result버튼  을 눌러 Post-processor로 진입

11. Plot database창의 하단에 있는 X Axis X Tab을 선택 후 Force/Translational Spring Damper/Spring1/DEFL_TSDA를 클릭한다. 다음, Plot Database창의 하단에 있는 Y Axis Y Tab을 선택 후 Force/Translational Spring Damper/Spring1/FSM_TSDA를 더블 클릭하여 스프링의 변형량 대 Spring 작용력에 대한 그래프를 그래서 변형에 대한 스프링력의 비선형 특징이 나타나는지 확인한다.



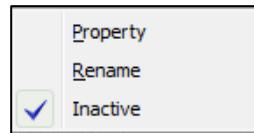
※ 위의 그래프의 결과와 같이 스프링이 16mm이상 변형시 강성이 배로 증가하며, 스프링의 강성 특성이 선형이 아닌 비선형적인 특성을 나타내면서 증가하는 결과를 확인할 수 있다.

STEP 6 Translational Spring을 Rotational Spring으로 모델링 변경

1. “Hand_Press_Machine.rdyn” Tab를 눌러

Plot 작업창에서 Pre-processor로 화면을 전환한다.

2. Database에서 Spring1을 우클릭한다. 팝업 메뉴에서 “Inactive”를 선택

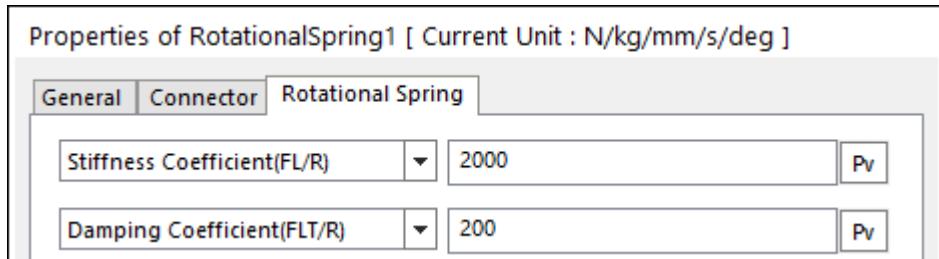


한다. (데이터 베이스에서 요소를 Inactive하면 모델 요소는 작업창에서 형상이 사라지고, 데이터베이스 창에서는 회색 패턴으로 나타나면서 존재는 하지만, 실질적으로 모델에 작동을 하지 않는 상태로 전환된다. 이는 요소를 차후 다시 되돌릴 때 매우 유용한 기능으로 요소를 생성하고 활성화/비활성화를 선택해서 모델에 적용할 수 있는 장점이 있어 자주 사용되니 알아두면 좋은 기능이다.)

3. Professional Tab의 Force Menu에서 Rotational Spring 아이콘을 클릭한 뒤, 생성

옵션을 Joint로 변경한다. 작업 창에서 RevJoint1을 마우스로 클릭하면 RevJoint1의 위치에 RotationalSpring1이 생성된다.

4. 생성된 RotationalSpring1의 대화 창을 열고, 다음과 같이 Spring Coefficient는 2000으로 Damping Coefficient는 200으로 입력하고 OK버튼을 눌러 대화 창을 닫는다.



5. Dynamic Simulation 버튼 을 누름 → Dynamic/Kinematic Analysis 창이 열림 → “Simulate” 버튼을 누름

6. Plot_Result 버튼 을 눌러 Post-processor로 진입

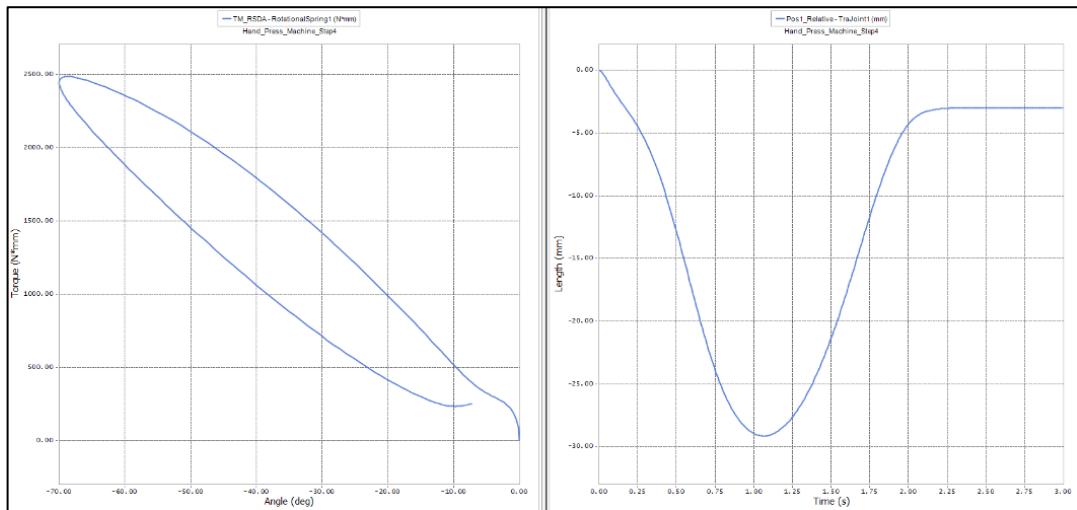
7. Window 버튼 의 하단에 있는 화살표 부분을 누르고 메뉴를 선택하여

Plot Window의 창이 좌우로 분할되도록 설정

8. 좌측 창을 마우스로 눌러 선택하고 Plot database창의 하단에 있는 X Axis X Tab을 선택 후 Force/Rotational Spring Damper/RotationalSpring1/DEFRZ_RSDA를 클릭한다. 다음, Plot Database 창의 하단에 있는 Y Axis Y Tab을 선택 후 Force/Rotational Spring

Damper/RotationalSpring1/TM_RSDA을 더블 클릭하여 스프링의 회전 변형량 대
Rotational Spring 작용 토크에 대한 그래프를 그래서 변형에 대한 스프링력의 비선형 특징
이 나타나는지 확인한다.

9. 우측 창을 마우스로 눌러 선택하고 Plot database창의 하단에 있는 X Axis X Tab을 선택
후 Time을 클릭한다. 다음, Plot Database창의 하단에 있는 Y Axis Y Tab을 선택 후
Joints/TraJoint1/Pos1_Relative를 더블 클릭하여 Head의 이동거리를 확인해본다.



Chapter 9. Contact

Lecture:

본 장에서는 RecurDyn에서 사용할 수 있는 여러 가지 접촉요소에 대한 여러 가지 생성 방법 및 정의 방법을 알아보고, 이 기능을 이용하여 Geneva Wheel에 대한 동역학 모델링을 수행하고 동역학적 메커니즘을 분석해 본다.

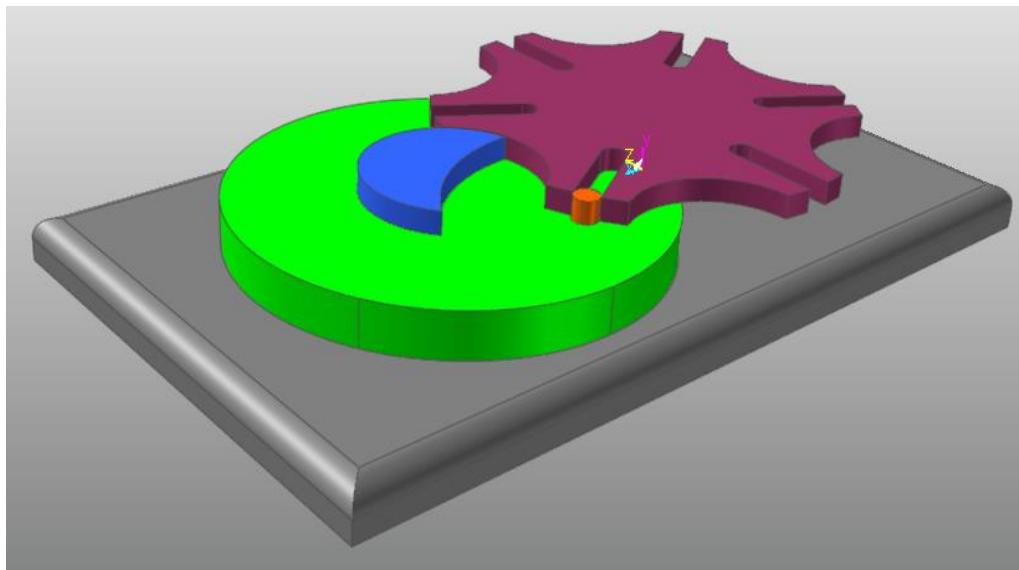
Workshop

접촉 요소를 이용하여 Geneva Wheel을 모델링 하고, 해석 결과를 분석해 본다.



수행시간

강의명	시간(분)
접촉 요소에 대한 강의	30 분
Geneva Wheel modeling Workshop	60 분



1. 접촉(Contact)

1) Hertz 접촉 이론

Hertz 접촉 이론은 두 물체가 접촉하여 하중을 받으면 접촉 부분이 변형하여 접촉면이 생기는 동시에 그 면 내에 접촉 압력이 발생한다는 이론으로서, 변형이 연속적이고 또한 접촉 부분이 물체에 대해 지극히 작은 경우에 해당되며 헤르츠(Hertz)가 1895년에 정립한 이론이다.

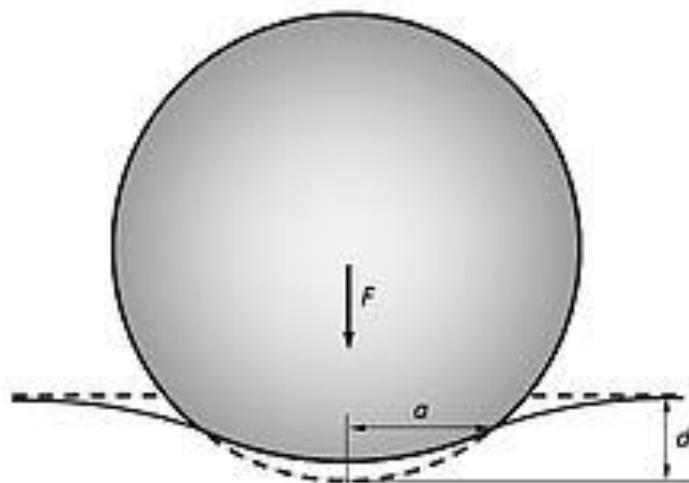


Figure 130 Hertz 접촉 이론

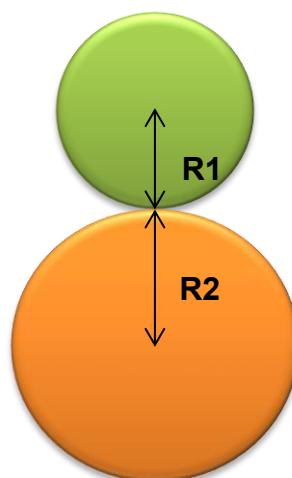
이러한 헤르츠 접촉 이론에 따르면, 접촉힘과 변형량과의 관계는 아래와 같은 식으로 나타낼 수 있는데, 이 식을 쉽게 풀이하면 탄성을 갖는 두 물체가 접촉할 때, 접촉힘과 변형량과는 비례 관계를 갖는데 그 비례관계는 두 물체의 형상과 물성치에 의해 결정된다는 것이다.

$$F = \delta^{\frac{3}{2}} \left[\frac{16 \cdot R \cdot E^2}{9} \right]^{\frac{1}{2}}$$

여기서, R(구의 반경)과 E(탄성 계수)는 다음과 같이 계산된다.

$$\frac{1}{E} = \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2}$$

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$



2) RecurDyn 접촉(Contact) 모델

RecurDyn의 접촉(Contact) 모델은 기본적으로 강체 바디를 기준으로 접촉 계산과 시뮬레이션을 수행하기 때문에 헤르츠 접촉 이론을 통하여 구현하지 않는다. 하지만, 강체 사이의 접촉 계산에 대해서도 헤르츠 접촉 이론과 유사한 방식으로 접촉을 처리하고 있다.

강체 사이의 접촉여부를 기하학적으로 판단하고 접촉이 발생되면 접촉량과 접촉 속도를 이용하여 컴플라이언트 힘과 마찰력을 계산하는 방식으로 접촉을 해석한다.

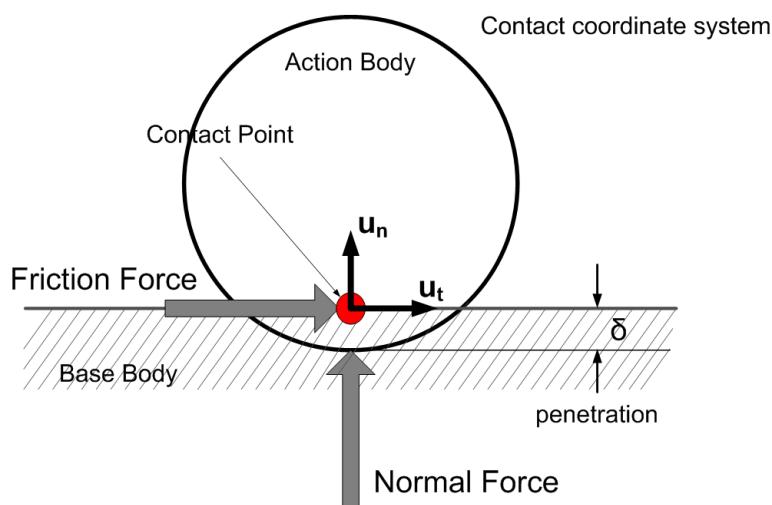


Figure 131 RecurDyn의 강체 사이의 접촉력 계산 모델

이 컴플라이언트 접촉력 모델에서 접촉 수직 힘(normal force)은 다음과 같이 정의된다.

$$f_n = k\delta^{m_1} + c\dot{\delta}^{m_2}\delta^{m_3}$$

여기서, δ 와 $\dot{\delta}$ 는 접촉량과 그에 대한 속도이다. 강성 계수와 감쇠 계수 k 와 c 는 실험적으로나 해석적(보통 Hertz식을 이용하지만 정확하지 않으므로 참고만 한다)으로 결정된다. 지수 m_1 과 m_2 는 접촉력의 비선형성을 나타내기 위하여 사용되며, 지수 m_3 은 접촉에 있어서 압입 감쇠 효과(indentation damping)를 위해서 사용되었다. 이 압입 감쇠 효과는 과도한 감쇠력이 작용하여, 전체 접촉력이 실제와는 다르게 음의 값을 가지게 되는 것을 방지하기 위하여 적용되었다. 이렇듯 실제와 다른 현상은 지수 m_3 을 1보다 크게 줌으로서 해결할 수 있다.

또한, 접촉시 마찰력은 다음의 식으로 결정된다.

$$f_f = \mu(v) f_n$$

여기서, $\mu(v)$ 는 마찰 계수이고 부호는 접촉 위치에서의 상대적 속도로부터 결정한다.
또한, 마찰 계수는 아래 그림과 같이 결정된다.

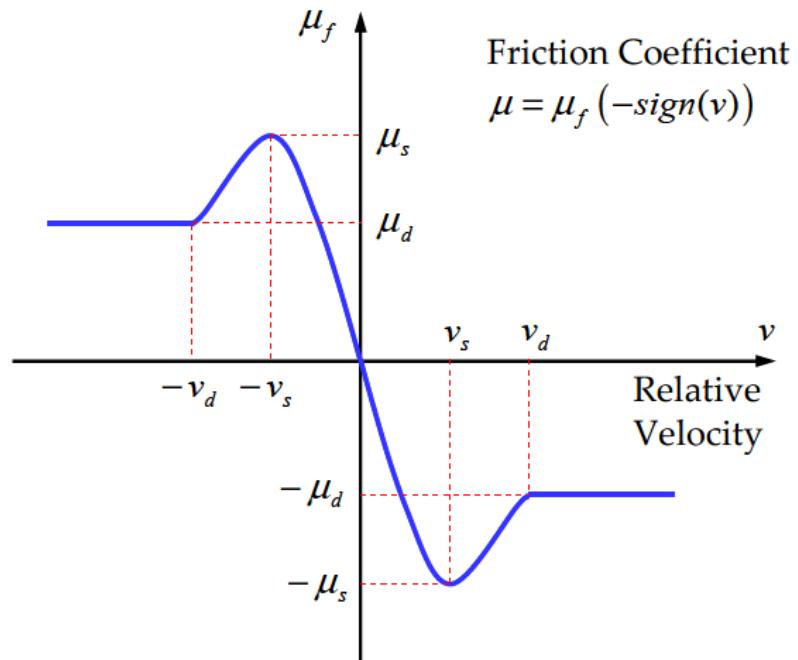


Figure 132 상대속도에 따른 마찰 계수 그래프

3) General Contact의 종류 및 특징

접촉(Contact) 요소는 일반적인 CAD형상의 표면에 대한 접촉 계산을 위한 General 접촉 요소와 RecurDyn에서 제공되는 이미 정해진 바디 형상인 실린더, 박스와 같은 바디들 사이의 접촉을 정의할 수 있는 Primitive 접촉요소와 Geometry의 Edge의 Curve나 Line의 형상 사이의 접촉을 정의할 수 있는 2D Contact 계열의 세 가지의 접촉 종류를 제공한다.

General Contact은 접촉 표면이 실린더나 불과 같이 이미 정해진 바디 형상이 아닌 일반적인 CAD로 구현된 복잡한 표면에 대한 접촉을 고려할 때 사용되는 접촉 요소들을 제공하는 접촉 그룹이다. 접촉을 구현하는 방식은 Base 접촉면을 작은 삼각형의 패치(Patch)들로 분할하여 접촉면을 생성하고 Action 접촉면을 어떠한 방식으로 접촉면을 생성하는가에 따라 접촉 종류가 나뉘어 진다. 예를 들면, Extended Surface to Surface는 Base와 Action 접촉면 모두 삼각패치를 이용한 접촉면으로 접촉을 계산하고 Surface to Sphere의 경우 Base 면은 삼각패치로 Action은 RecurDyn의 Sphere 바디를 직접적으로 접촉면으로 사용하여 접촉을 계산하는 방식으로 두 접촉의 차이는 Action면을 어떻게 처리하느냐에 따라 접촉 종류가 달라진다. 이와 같이 접촉 종류를 세분화한 이유는 접촉 계산 성능을 효율적으로 수행하기 위해서인데, 접촉하는 바디 중 한 바디가 Sphere로 모델링 되어 있다면 Surface to Sphere를 사용하는 것이 더 빠르고 접촉 노이즈를 줄인 결과를 얻을 수 있기 때문이다.

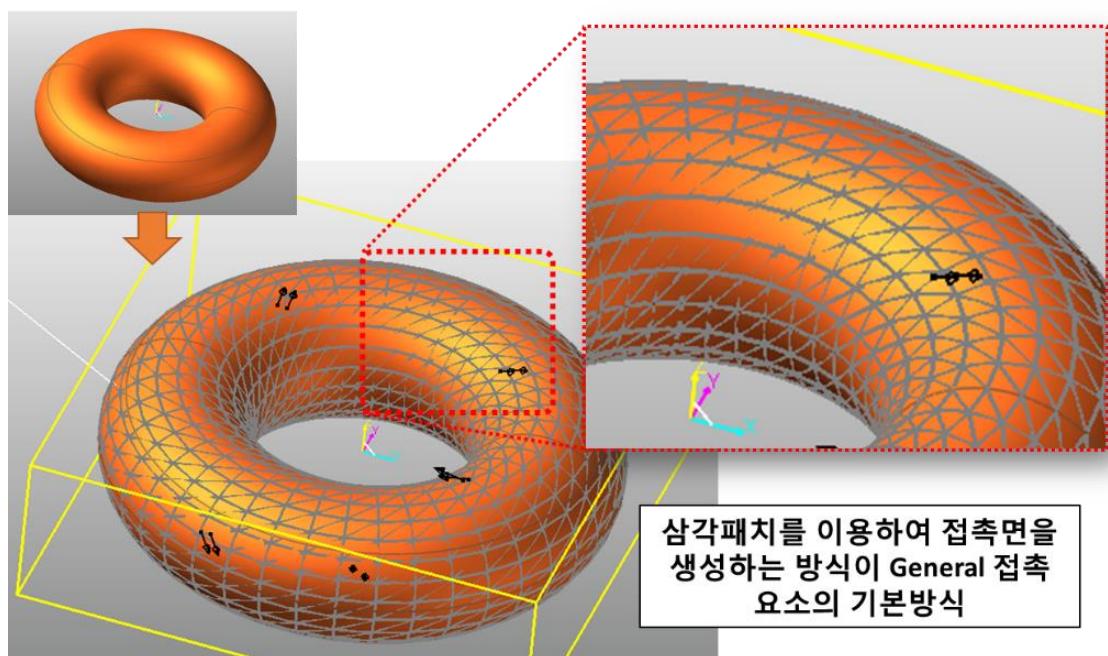


Figure 133 General 접촉 요소

(1) Solid Contact

Solid Contact은 두 바디의 전체 표면을 삼각패치로 전부 접촉면을 생성하여 두 바디의 Volume(부피)를 구하고 두 바디의 Volume이 서로 접촉을 하는지 판단하는 알고리즘으로 바디 사이의 접촉을 계산하는 특징을 갖은 접촉 요소이다.

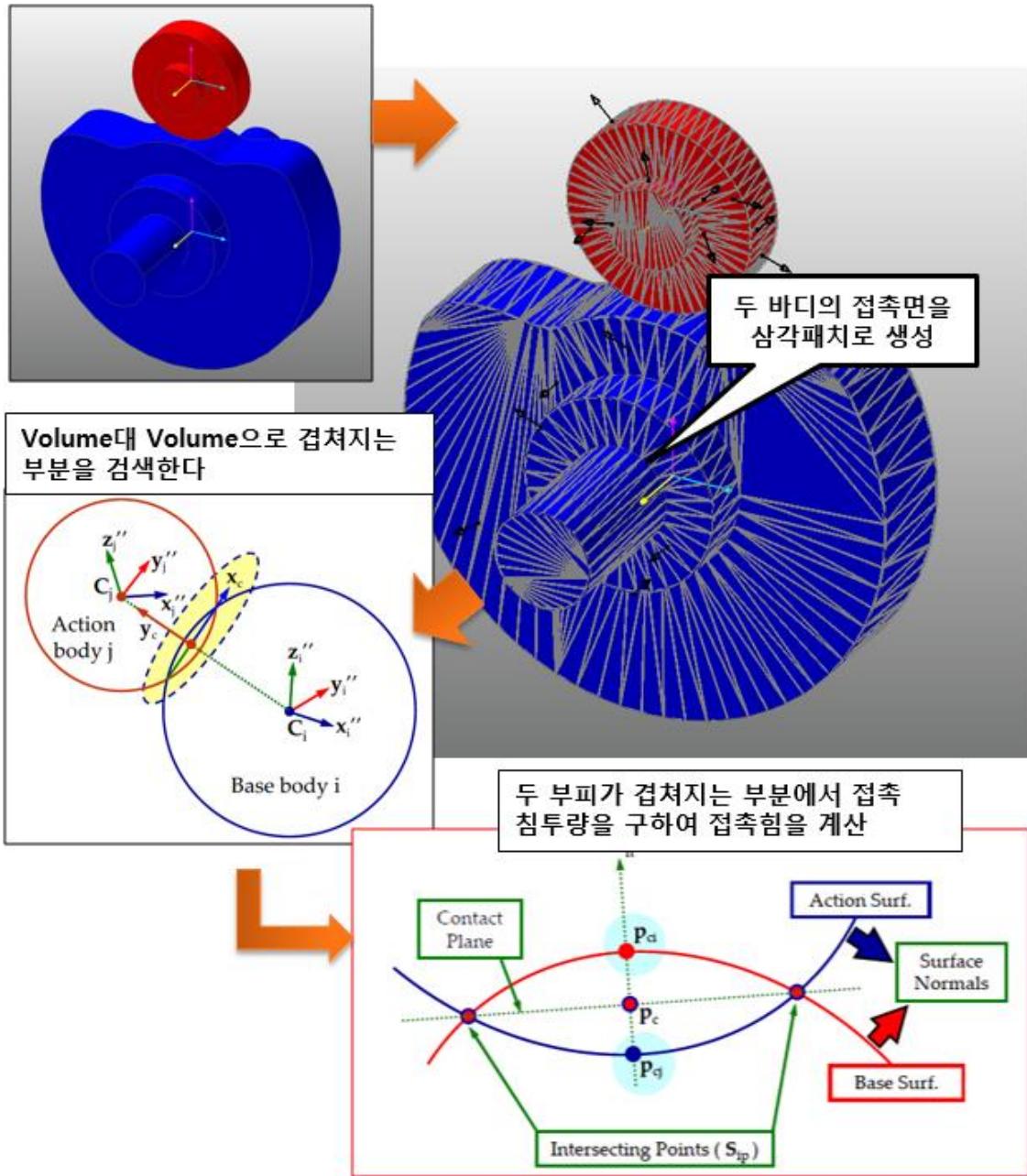


Figure 134 Solid Contact의 접촉 계산 방식

(2) Geo Surface Contact

가장 최신 개발 접촉 요소로서 일반적인 거의 모든 접촉 상황에 대해서 대응이 가능한 접촉 요소로 개발되었다. Base면과 Action면을 삼각패치 대 삼각패치로 생성하거나 Base는 삼각패치 Action은 접촉 노드(Contact Node)로 생성하여 접촉을 생성하는 등 다양한 옵션을 조합하여 효율적으로 접촉 계산을 수행할 수 있기 때문에 활용 빈도가 높은 접촉 요소이다.

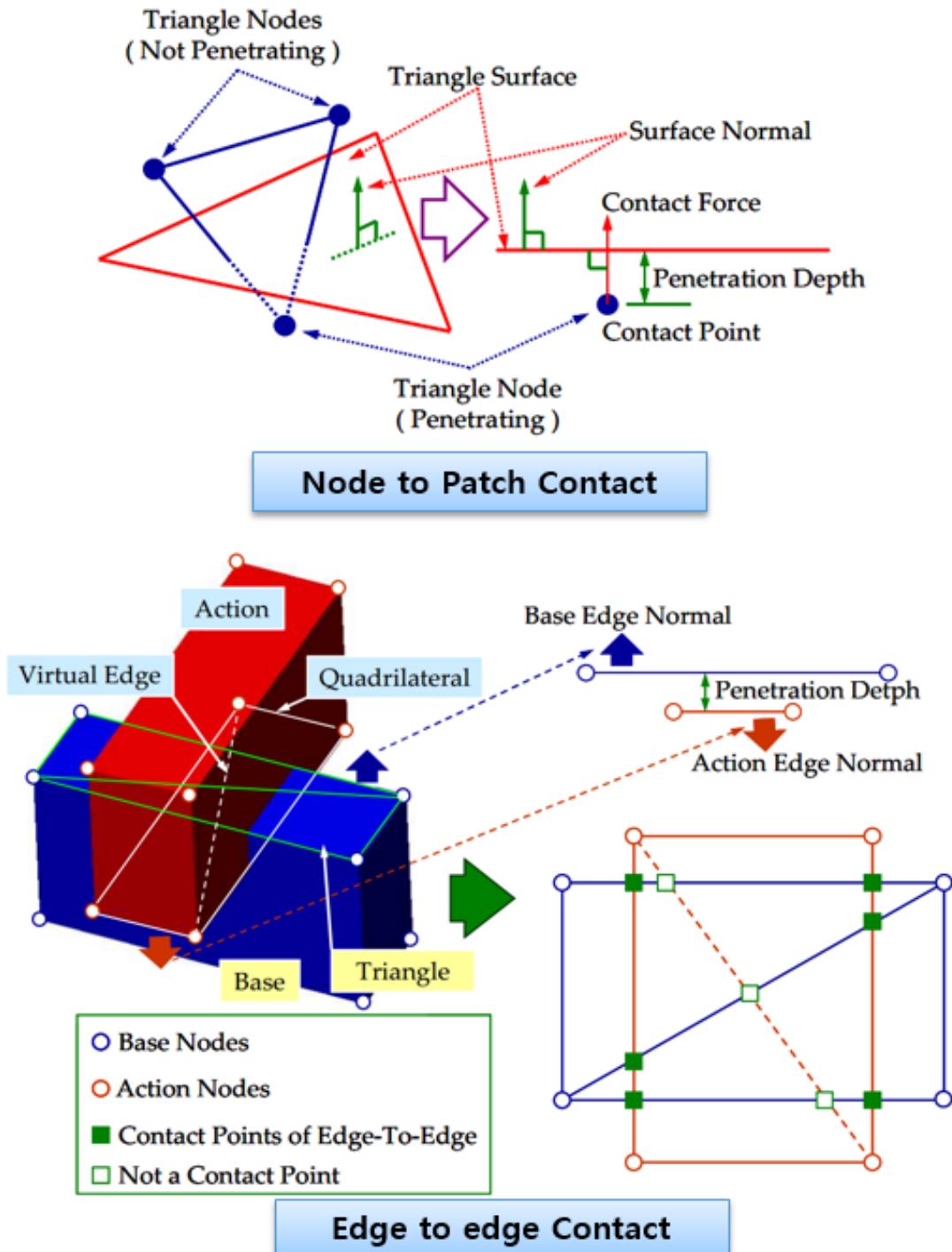


Figure 135 Geo Contact의 접촉 계산 방식

(3) Surface to Surface Contact

BASE 접촉면은 삼각패치를 이용하여 접촉면을 생성하고 ACTION 접촉면은 접촉 노드를 이용하여 접촉면을 생성하여 BASE의 삼각패치와 ACTION의 접촉 노드에 대한 접촉을 계산하는 방식의 Surface계열 접촉요소이다.

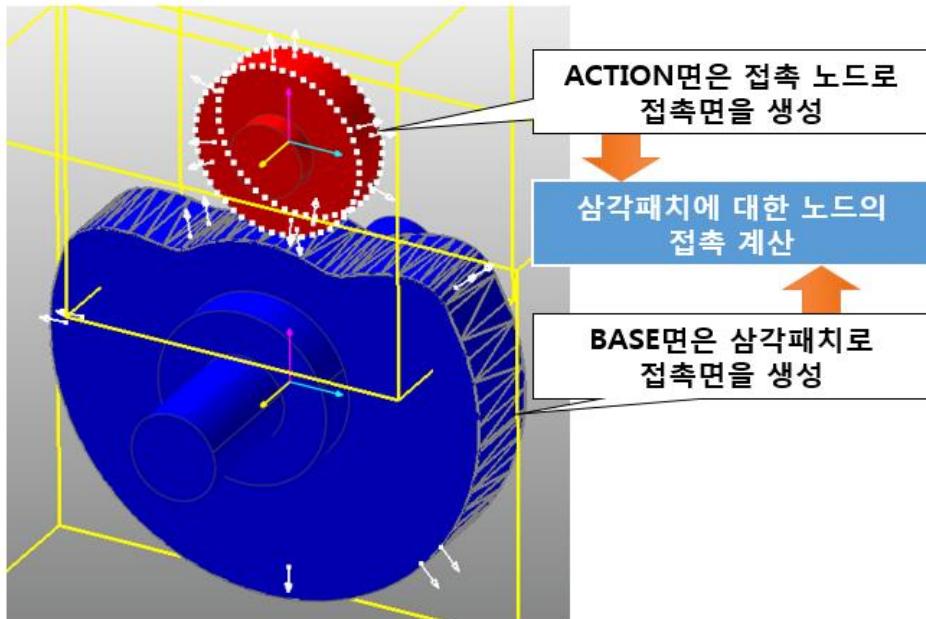


Figure 136 Surface to Surface Contact의 접촉 계산 방식

(4) Extended Surface to Surface Contact

BASE와 ACTION 접촉면 모두 삼각패치로 접촉면을 생성하고 접촉을 계산하는 Surface 계열 접촉요소이다. Surface to Surface contact 요소를 쓸 경우 생길 수 있는 Edge(가장자리)부분에서 접촉이 안 되는 문제를 보완할 수 있는 장점이 있다.

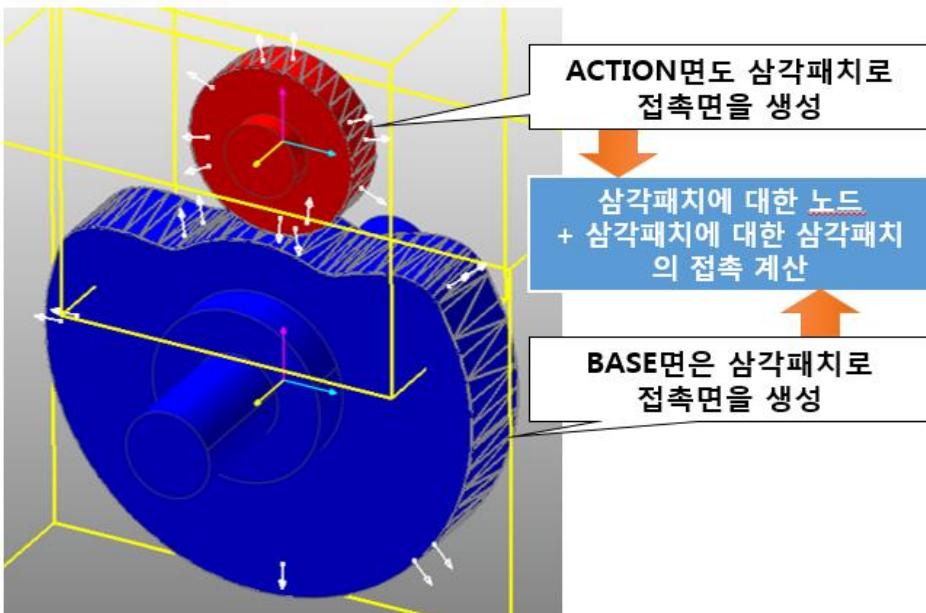


Figure 137 Extended Surface to Surface Contact의 접촉 계산 방식

(5) Sphere to Surface Contact

BASE면은 삼각패치로 생성하고 ACTION은 Sphere 바디만 인식하여 ACTION에 대하여 수학적으로 Sphere의 중심 위치와 반경을 계산하여 BASE면과의 접촉 판정을 보다 빠르게 수행할 수 있는 접촉 요소이다.

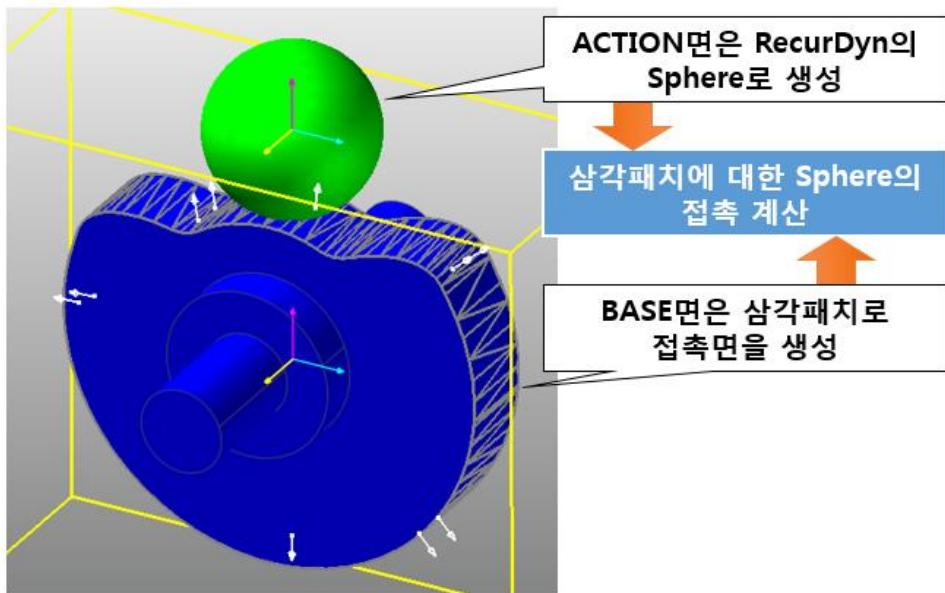


Figure 138 Sphere to Surface Contact의 접촉 계산 방식

(6) Cylinder to Surface Contact

BASE면은 삼각패치로 생성하고 ACTION은 Cylinder 바디만 인식하여 ACTION에 대하여 수학적으로 Cylinder의 중심 위치와 자세 및 반경을 계산하여 BASE면과의 접촉 판정을 보다 빠르게 수행할 수 있는 접촉 요소이다.

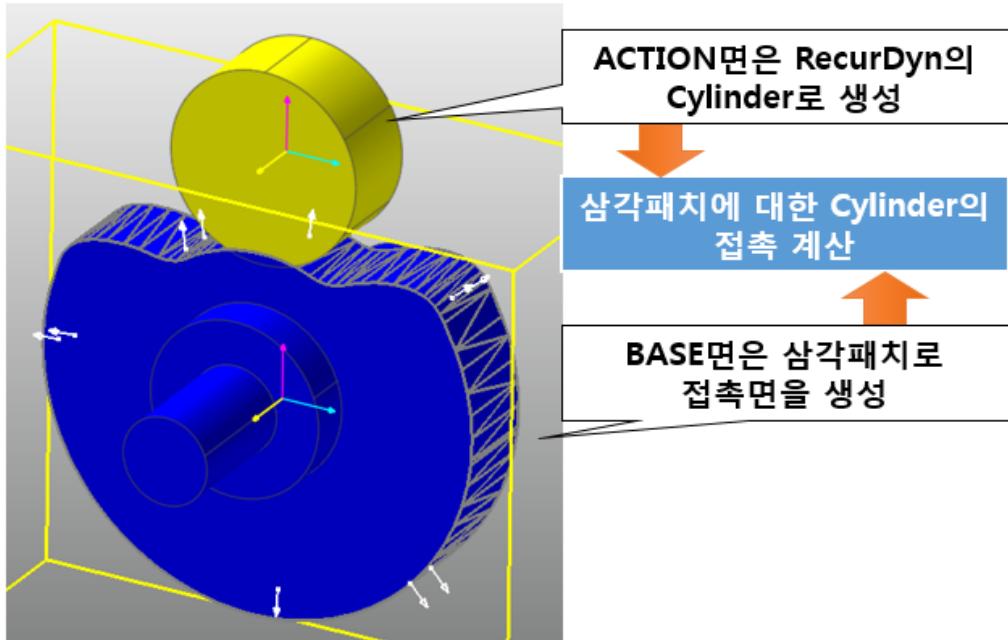


Figure 139 Cylinder to Surface Contact의 접촉 계산 방식

4) Primitive 3D Contact의 종류 및 특징

Cylinder와 Sphere 같은 바디는 형상 정보가 단순하여 접촉을 할 경우에도 그에 대한 접촉상황을 예측 가능하기 때문에 삼각패치를 사용하지 않고 바디의 위치와 자세 정보로 부터 접촉상황을 판단하여 접촉력을 계산할 수 있는 장점이 있어 여러 가지 형상과 형상 사이의 경우의 수를 따져 사용 빈도가 높은 바디와 바디 사이의 전용 접촉을 개발한 접촉요소이다. 단, RecurDyn/Professional의 Body Tab에서 만든 바디에 대해서만 접촉 지정이 가능하다.

Primitive 3D 접촉의 접촉 계산 방식은 아래의 그림과 같이 직접 Sphere와 Sphere 바디 위치와 자세를 통하여 두 바디 사이의 거리를 직접 구하고 그 거리를 이용하여 두 바디가 접촉이 되었는지 판정하고 접촉력을 구하는 방식이다. 이러한 Analytical 접촉 계산 방식으로 접촉을 계산하기 때문에 General 접촉 요소들에 비하여 접촉 계산 시간이 빠른 장점이 있다.

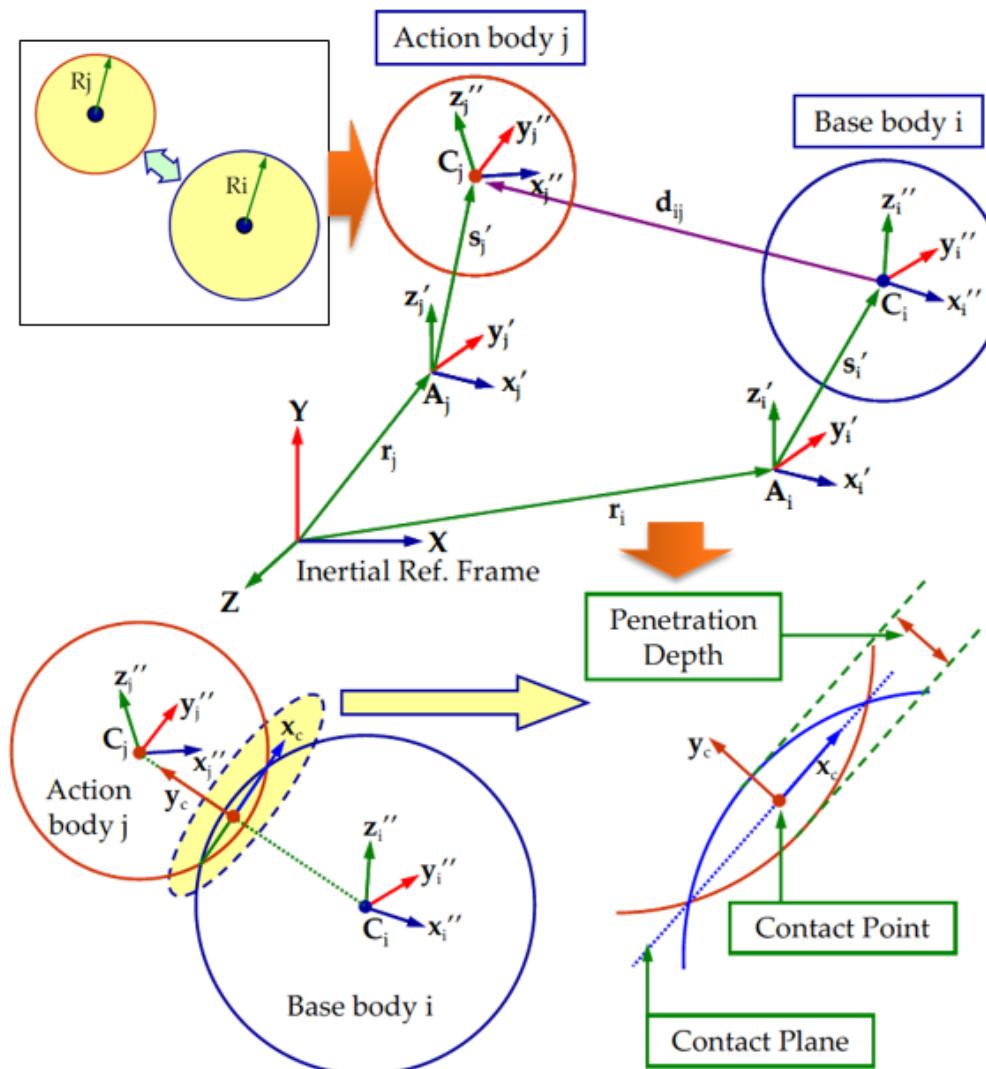


Figure 140 Primitive 3D Contact(Sphere to Sphere)의 접촉 계산 방식

Primitive 3D Contact의 종류

아이콘	이름	설명
 Sph-Sph	Sphere to Sphere	Sphere와 Sphere 형상의 접촉 상황에 사용 가능한 접촉 요소
 Sph-Cyl	Sphere to Cylinder	Sphere와 Cylinder 표면과의 접촉 상황에 사용 가능한 접촉 요소
 Sph-Box	Sphere to Box	Sphere와 Box 표면과의 접촉 상황에 사용 가능한 접촉 요소
 Sph-Torus	Sphere to Torus	Sphere와 도넛 형상의 Torus 표면과 사용 가능한 접촉 요소
 Sph Con	Sphere to Cone	Sphere와 Cone 표면과 접촉 상황에 사용 가능한 접촉 요소
 Sph(Sph)	Sphere in Sphere	큰 Sphere 안에 작은 Sphere가 들어 있는 접촉 상황에 사용 가능한 접촉 요소
 Sph(Cyl)	Sphere in Cylinder	Cylinder 안에 작은 Sphere가 들어 있는 접촉 상황에 사용 가능한 접촉 요소
 Sph(Box)	Sphere in Box	Box 안에 작은 Sphere가 들어 있는 접촉 상황에 사용 가능한 접촉 요소
 Sph(Torus)	Sphere in Torus	도넛 형상의 Torus 내부에 Sphere가 들어있는 접촉 상황에 사용 가능한 접촉 요소
 Cyl Cyl	Cylinder to Cylinder	두 Cylinder 표면 사이에 접촉 상황에 사용 가능한 접촉 요소
 Cyl-Con	Cylinder to Cone	Cylinder와 Cone 표면 사이에 접촉 상황에 사용 가능한 접촉 요소
 Cyl(Cyl)	Cylinder in Cylinder	큰 Cylinder 내부에 작은 Cylinder가 들어있고 서로 접촉 하는 상황에 사용 가능한 접촉 요소
 Con-Con	Cone to Cone	두 Cone 표면 사이에 접촉 상황에 사용 가능한 접촉 요소
 Con(Con)	Cone in Cone	큰 Cone안에 작은 Cone이 들어있고 서로 접촉 하는 상황에 사용 가능한 접촉 요소
 Sph-ArcR	Sphere to Arc Rev.	Arc 형상을 특정 축을 중심으로 회전시킨 형상과 Sphere가 접촉하는 상황에 사용하는 접촉으로서 보통 볼 베어링의 레이스와 볼 사이의 접촉 상황에 사용 가능한 접촉
 Sph-ArcE	Sphere to Are Ext.	Arc 형상을 특정 축 방향으로 Extrude 형상과 Sphere가 접촉하는 상황에 사용 가능한 접촉

Primitive 3D 컨택 중, Cylinder in Cylinder 접촉의 경우 큰 Cylinder의 윗면 또는 아랫면을 접촉에서 제외하여 Cylinder 형상에서 특정 면이 개방된 형태의 접촉 상황을 정의할 수 있다. 정의하는 방법은 접촉 대화 창을 열고 개방하고자 하는 면을 Open Face 옵션에서 선택하면 된다. 아래의 예는 Cylinder in Cylinder 접촉의 아랫면을 개방할 때, Open Face 옵션 선택의 예이다.

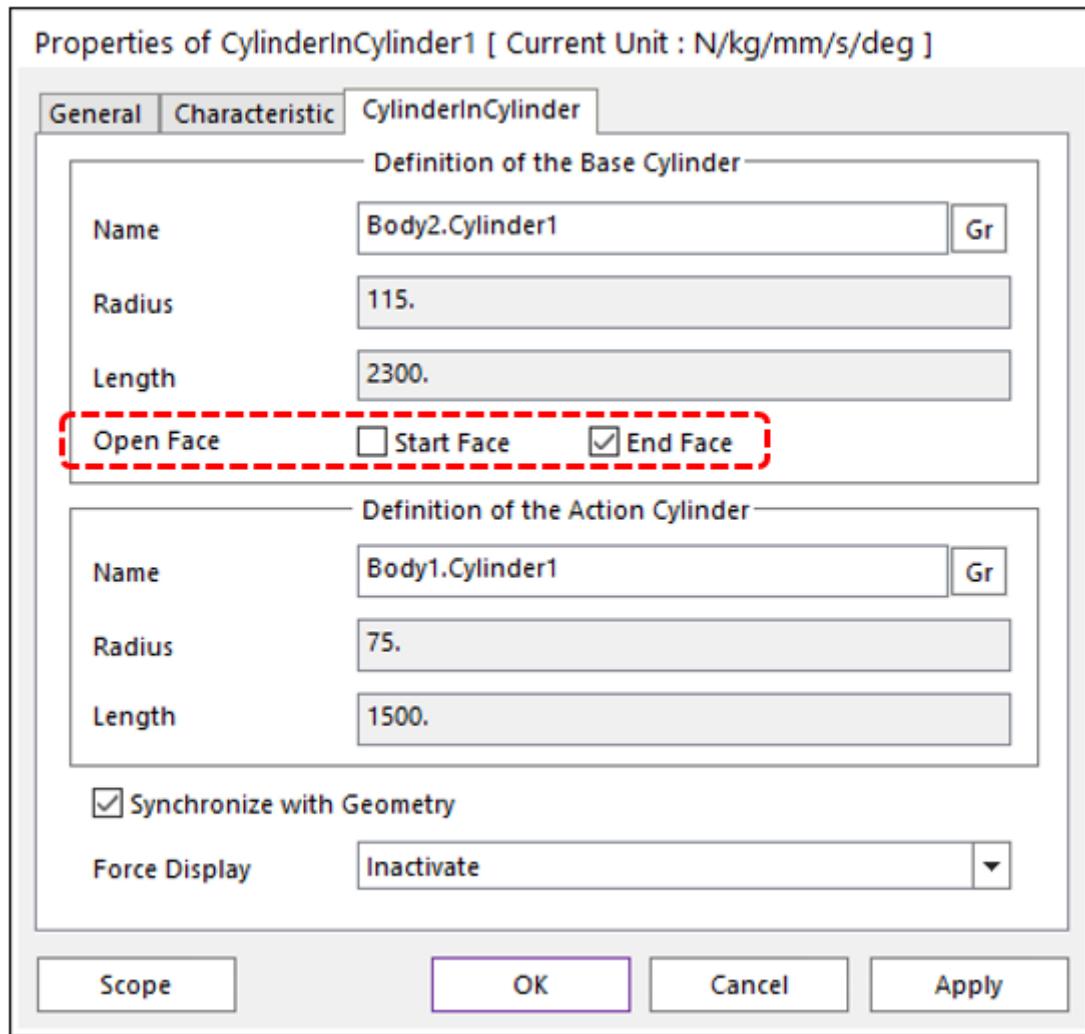


Figure 141 Primitive 3D 접촉의 “Open Face” 옵션

5) 2D Contact의 종류 및 특징

3차원 CAD 형상의 바디라고 해도 동적 움직임이 2차원에 해당되는 시스템에서 접촉은 면과 면의 접촉이 아닌 선과 선(Curve to Curve) 형태의 접촉 알고리즘으로 접촉을 구현할 수 있다. 예를 들어, 엔진의 CAM 시스템의 경우 CAM과 Valve는 2차원적 움직임으로 충분히 시스템의 접촉 상황을 모델링 할 수 있기 때문에 CAM의 외곽 Profile과 Valve의 Profile에 대해 접촉 모델을 구현할 수 있다. 이와 같은 모델링을 진행하면 접촉 위치를 보다 명확하게 계산할 수 있기 때문에 보다 Smooth한 접촉 결과를 보다 빠르게 얻을 수 있는 장점이 있다.

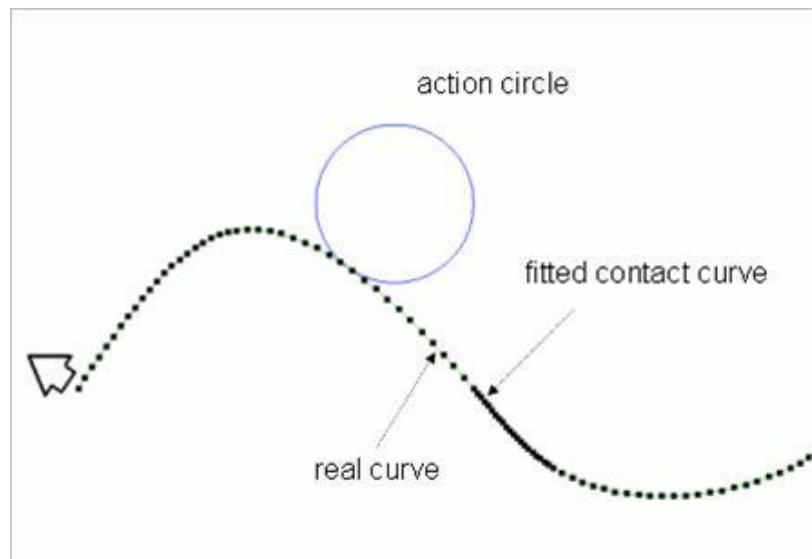


Figure 142 Circle to Curve Contact 계산 방식

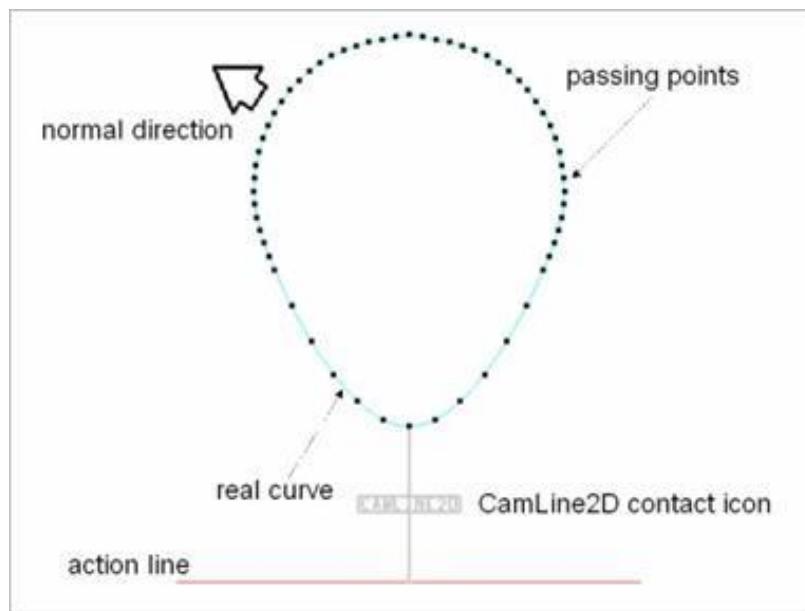


Figure 143 CamLine2D Contact 계산 방식

-2D Contact의 종류

아이콘	이 름	설 명
 Geo Cur	Geo Curve	다양한 형상의 Spline Curve과 Circle등의 형상에도 2D 접촉을 정의할 수 있는 통합형 2D 접촉요소로 거의 대부분의 2D 접촉을 정의할 수 있는 접촉 요소
 Cur-Cur	Curve to Curve	BASE/ACTION Curve 모두 Spline Curve로 정의하고 두 Curve 사이의 2D 접촉을 정의하는 접촉요소
 Cir-Cur	Circle to Curve	BASE Curve는 Spline Curve로 정의하고 ACTION을 Circle 형상으로 2D 접촉을 정의하는 접촉 요소
 Cir-Cir	Circle to Circle	BASE/ACTION 모두 Circle 형상으로 정의하고 Circle 대 Circle의 2D 접촉을 정의하는 접촉 요소
 Cir(Cir)	Circle in Circle	BASE/ACTION 모두 Circle 형상으로 정의하고 Base Circle 안의 Action Circle의 2D 접촉을 정의하는 접촉 요소
 Cam2D	Cam2D	엔진 시스템의 Cam-Valve 기구에서 Cam과 Valve의 접촉을 Cam의 2D Profile과 Valve의 Curve를 2D 접촉으로 정의하는 접촉 요소
 CamLine2D	CamLine2D	엔진 시스템의 Cam-Valve 기구에서 Cam과 Valve의 접촉을 Cam의 2D Profile과 Valve의 직선 Line을 2D 접촉으로 정의하는 접촉 요소

6) 접촉(Contact) Entity 생성 방법

(1) 접촉 요소 생성방법

접촉 요소를 생성하는 일반적인 방법은 접촉하는 두 바디의 접촉면들을 선택하여 접촉 요소를 정의한다. RecurDyn은 접촉 요소 생성 시 몇 가지 생성 옵션을 제공하여 편의성을 제공한다.

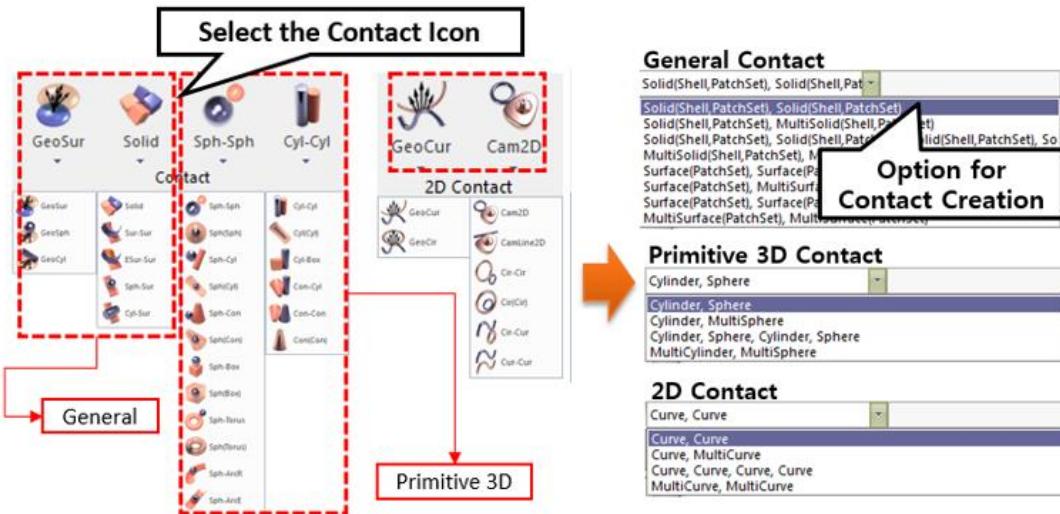


Figure 144 접속 요소 생성 옵션

Solid(or MultiSolid): Working Window에서 Solid 형상을 접촉대상으로 선택할 수 있는 옵션, 선택된 Solid의 모든 면을 삼각패치로 접촉면을 생성하는 옵션이다.

Surface(or MultiSurface): Working Window에서 특정 Surface 형상을 접촉대상으로 선택할 수 있는 옵션, 선택된 Surface에 대해서만 삼각패치로 접촉면을 생성하는 옵션이다.

Geometry(or MultiGeometry): Cylinder, Box 등 Primitive 3D 접촉 요소에 따라 선택할 수 있는 Geometry의 옵션을 나타낸다. Geometry에 해당하는 RecurDyn의 바디 형상을 선택할 수 있다.

Curve(or MultiCurve): Working Window에서 Curve/Circle 형상을 접촉대상으로 선택할 수 있는 옵션, Curve나 Circle에 대하여 접촉 노드로 접촉 Curve를 생성하는 옵션이다.

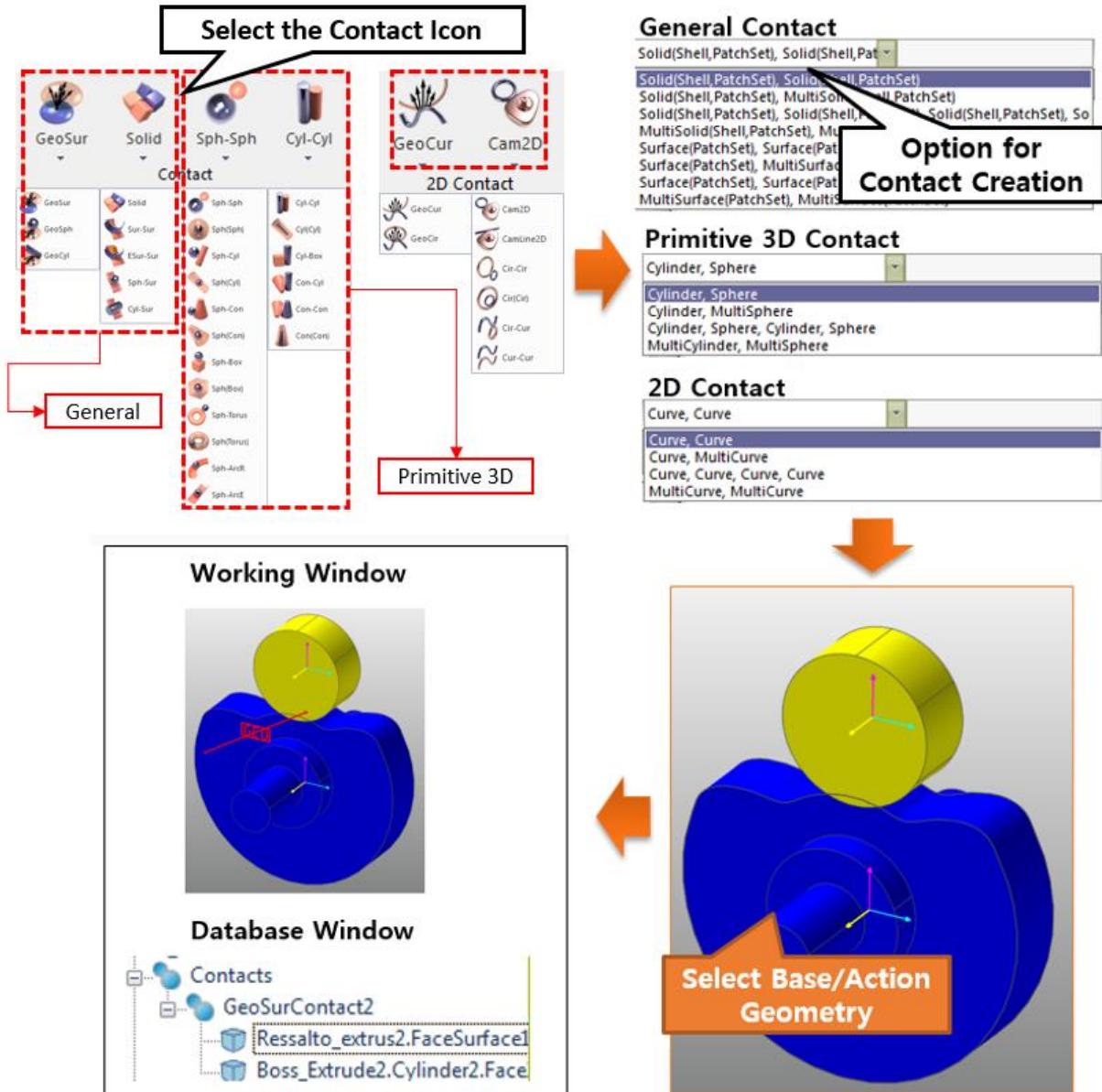


Figure 145 접촉 요소 생성 방법

7) 접촉 요소의 수정 방법

접촉 요소의 수정에는 접촉하는 바디/접촉면을 수정하는 방법은 접촉 요소의 Property 대화 창을 열어 대화 창에서 Base/Action의 접촉면에 대한 정보를 입력 및 수정하는 방법으로서 수정할 수 있다. 작업 창에서 접촉 요소의 아이콘을 선택 후 키보드 <P> 버튼을 누르거나 마우스 오른쪽 버튼을 눌러 Property 메뉴를 선택하여 Property 대화 창을 열어 수정한다.

Property 대화 창에서 수정하는 방법은 사용자가 “Gr” 버튼을 누른 후 작업 창에서 수정할 접촉면을 선택하여 입력할 수 있으며, 형상에 대한 파라미터 수정은 원하는 수치를 입력하여 수정한다.

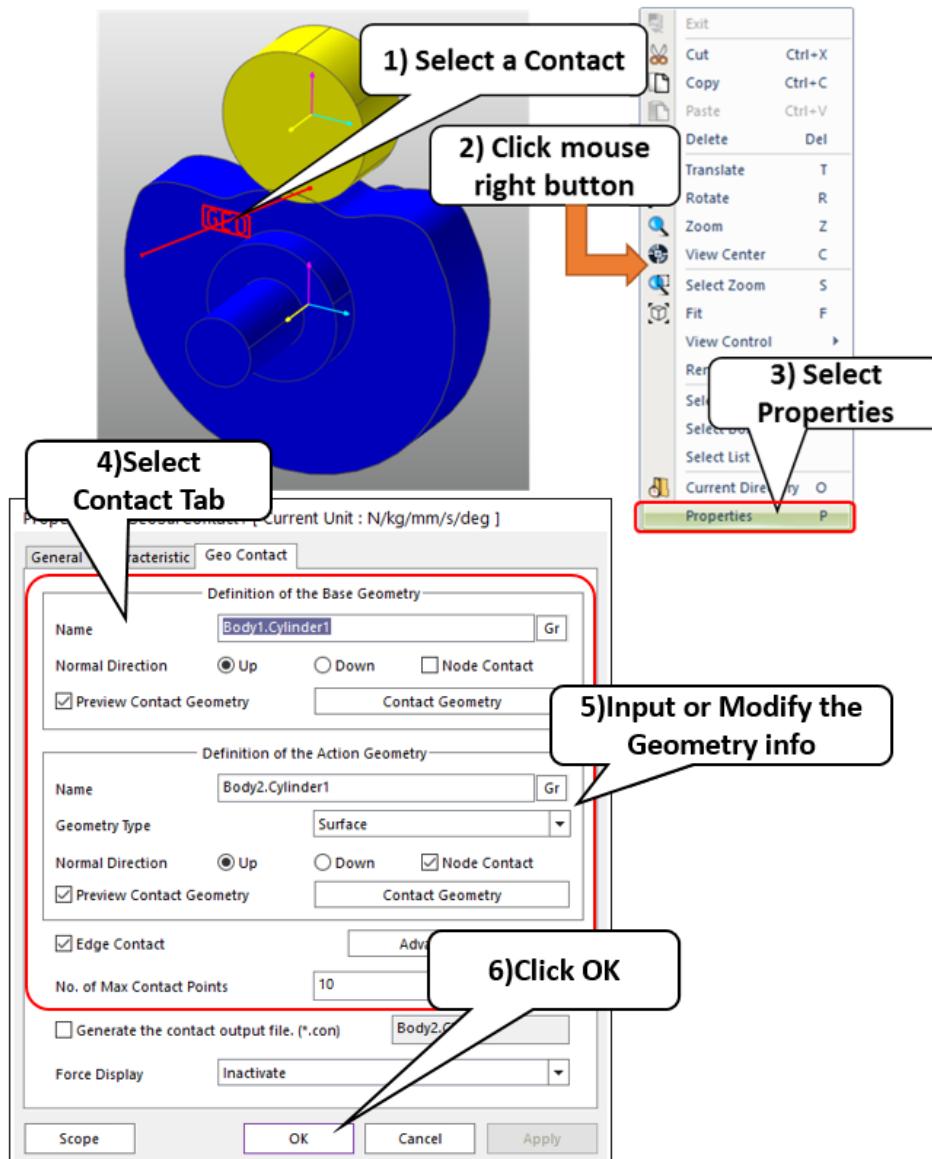


Figure 146 접촉 요소 Property 대화 창을 이용한 직접 수정 방법 및 순서

- Normal Direction(Up or Down): 해당 접촉면에 대해서 상대 접촉면이 접촉 되는 방향을 정한다. (반대로 정의할 경우 접촉이 안될 수 있으니 주의가 필요함)
- Node Only: 삼각패치로 접촉면을 생성하지만 Node Only 옵션을 활성화하면 삼각 패치의 Line은 접촉으로 계산하지 않고 삼각패치의 3개 모서리의 접촉 노드만 접촉으로 계산하는 옵션으로 Line이 제거되어 접촉을 계산하기 때문에 접촉 계산이 빠르다
- Edge Contact: Geo Contact에서만 사용되는 옵션이다. 옵션이 체크가 되면 두 접촉 면의 Edge 부분도 접촉에 계산된다. 옵션 해제 시는 두 접촉면의 Edge는 접촉에서 제외된다.

보다 효과적인 접촉을 위하여 접촉 요소의 Surface Patch 버튼을 눌러 하위 옵션을 조절하여 계산 성능을 향상 시킬 수 있다. 대표적인 Surface 옵션은 다음과 같다.

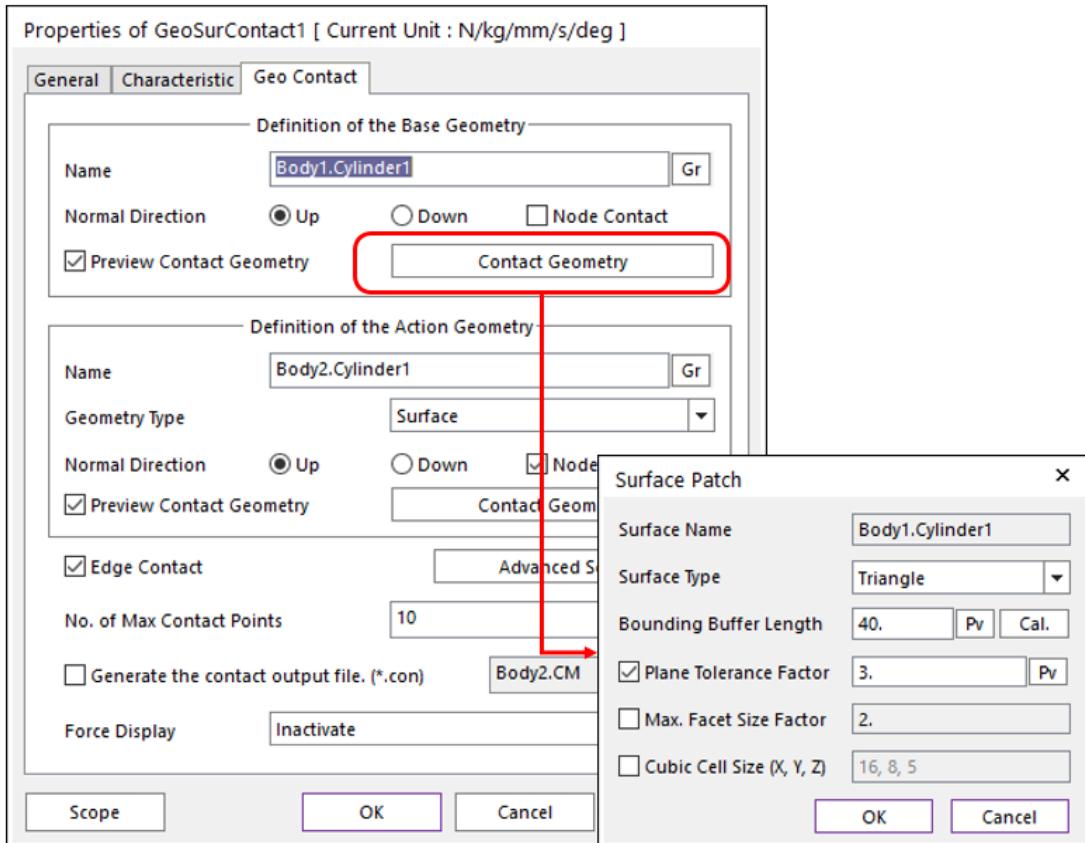
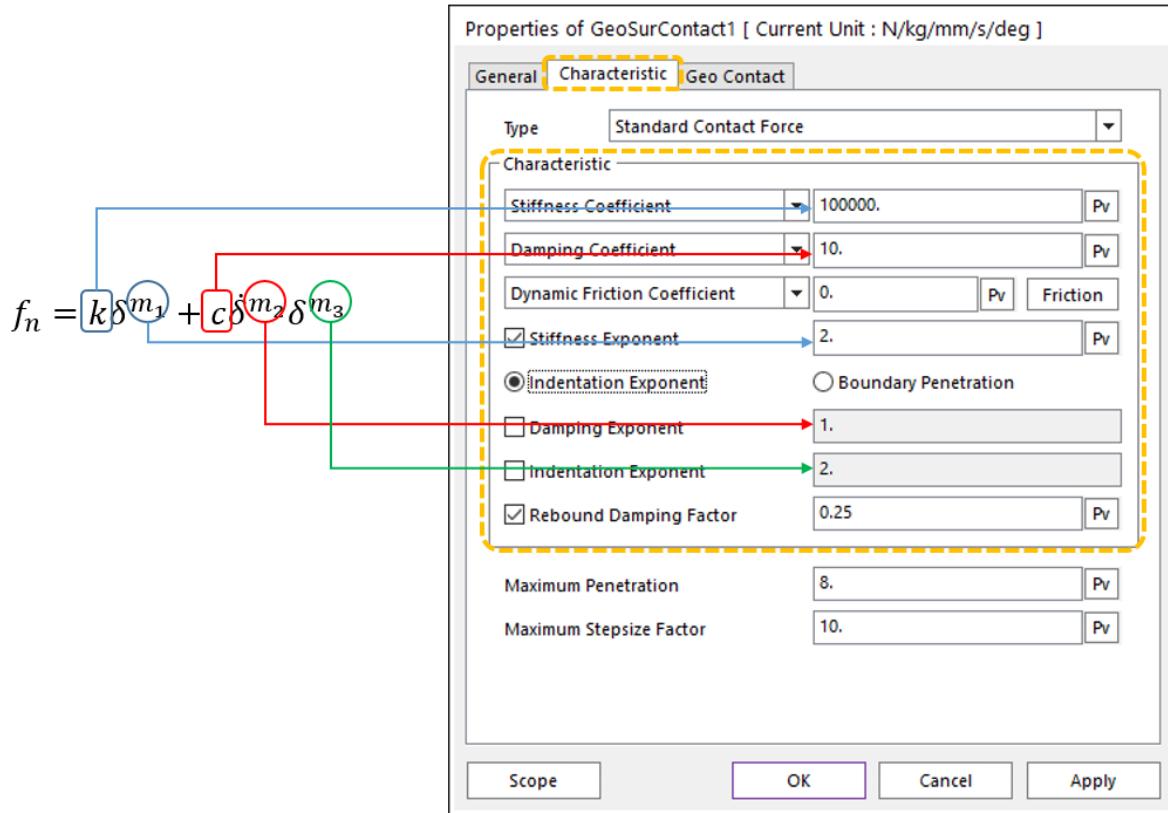


Figure 147 접촉 요소 Surface Patch 옵션 설정

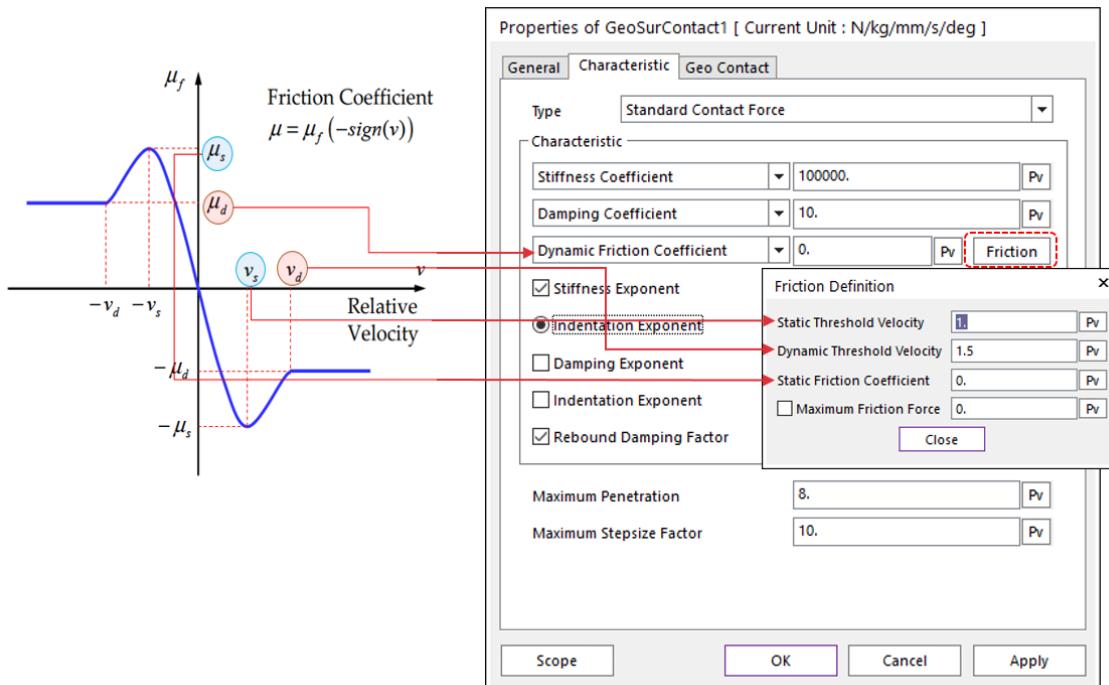
- Bounding Buffer Length: 실제 Geometry가 갖고 있는 Bounding Box 사이즈의 offset length를 입력한다. (범위를 넓히면 접촉 대상 범위를 넓히고, 작게 입력하면 접촉 대상 범위를 줄인다.)
- Plane Tolerance Factor: 접촉면을 삼각패치로 생성할 때 삼각패치의 사이즈를 결정하는 Factor로 1을 입력하면 가장 작은 Patch 사이즈를 사용하고 반대로 10을 입력하면 가장 큰 Patch를 이용하여 접촉면을 만들어 낸다.
- Max. Facet Size Factor: 삼각패치의 크기를 제한시켜 삼각패치로 접촉면을 생성하는 기능이다.
- Cubic Cell Size: 3차원 공간상에서 각 방향으로 접촉면을 분할하는 옵션이다. 접촉 계산의 효율을 위해 공간 대 공간의 접촉 검색 시 사용되는 알고리즘으로 문제가 되지 않는 한 기본값을 변경하지 않는 것이 좋다.

8) 접촉 요소의 속성 변경 방법

접촉 요소는 Property 대화창 Characteristic page에서 접촉력 계산시 사용되는 두 바디 사이의 접촉 강성 계수(Stiffness Coefficient)와 감쇄 계수(Damping Coefficient), 마찰 계수 그리고 접촉 파라미터 등을 입력하거나 수정하여 접촉 요소의 속성을 변경할 수 있다.



Stiffness와 Damping Coefficient



Friction Coefficient

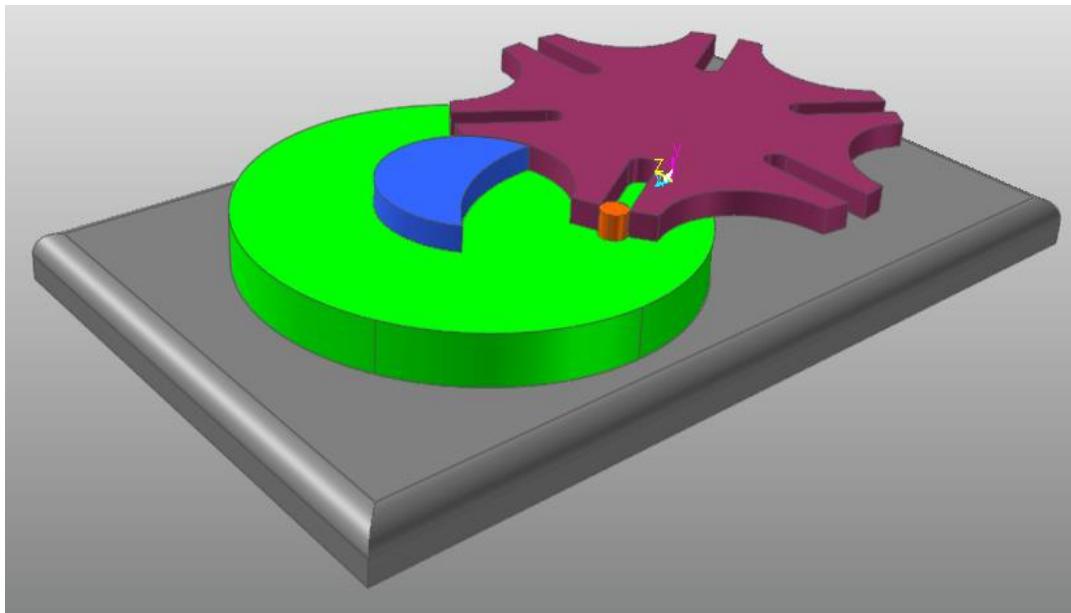
Figure 148 접촉 요소 속성 변경 방법

Workshop 9 Geneva Wheel

내용: RecurDyn의 Professional과 Contact 메뉴들을 이용해서 Geneva Wheel 시스템에 대한 모델링을 통하여 접촉 거동을 해석 및 분석한다.

본 워크샵을 통해 아래의 관련기능을 익힐 수 있다.

- Geometry 생성 방법
- Contact 생성 방법



수행시간	40분
난이도 Level	2

Workshop 수행을 위해 필요한 사항

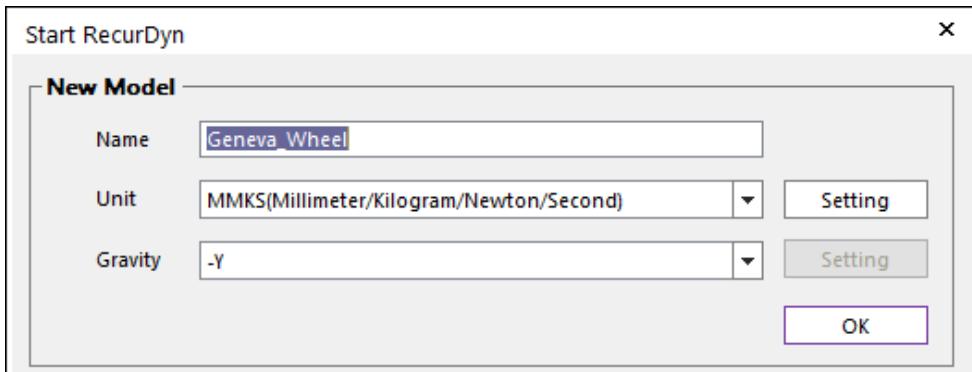
- RecurDyn Professional

STEP 1 Geneva Wheel 모델의 Geometry 모델링

1. 시작 메뉴에서 RecurDyn 실행

2. New Model 실행 → ‘Geneva_Wheel’이라는 이름으로 새로운 모델을 생성

- Name: Geneva_Wheel
- Unit: MMKS
- Gravity: -Y



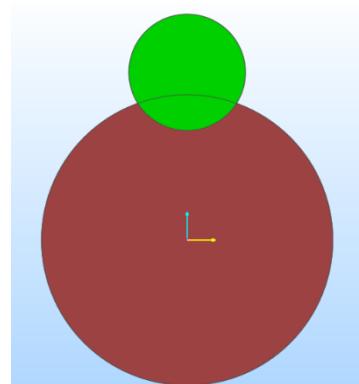
3. Professional Tab > Body 메뉴 > General 아이콘을 클릭 → Body Edit Mode로 진입한다.

4. View Control 메뉴에서 작업 평면을  “Change ZX”로 변경한다.

5. Body>General을 클릭하여 Body Edit Mode로 들어간다.

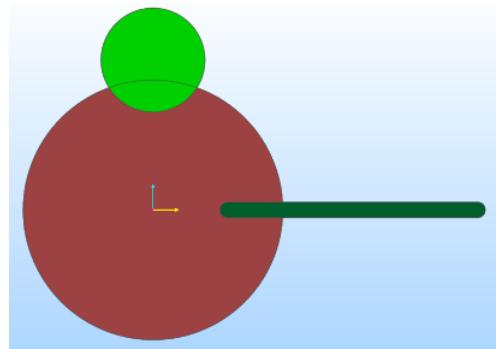
6. Body Edit Mode > Geometry Tab > Marker and Geometry> Cylinder 아이콘 클릭 > 생성 옵션을 “Point,Point,Radius” 선택 > First Point로 (0,10,0)을 직접 입력 <Enter> > Second Point는 (0,15,0) 입력 <Enter> > Radius로 “52” 직접 입력 후 <Enter> Cylinder1을 생성

7. Geometry Tab > Solid and Marker > Cylinder 아이콘 클릭 > 생성 옵션을 “Point,Point,Radius” 선택 > First Point로 (60,15,0)을 직접 입력 <Enter> > Second Point는 (60,10,0) 입력 <Enter> > Radius로 “20.8” 직접 입력 후 <Enter>로 Cylinder2를 생성

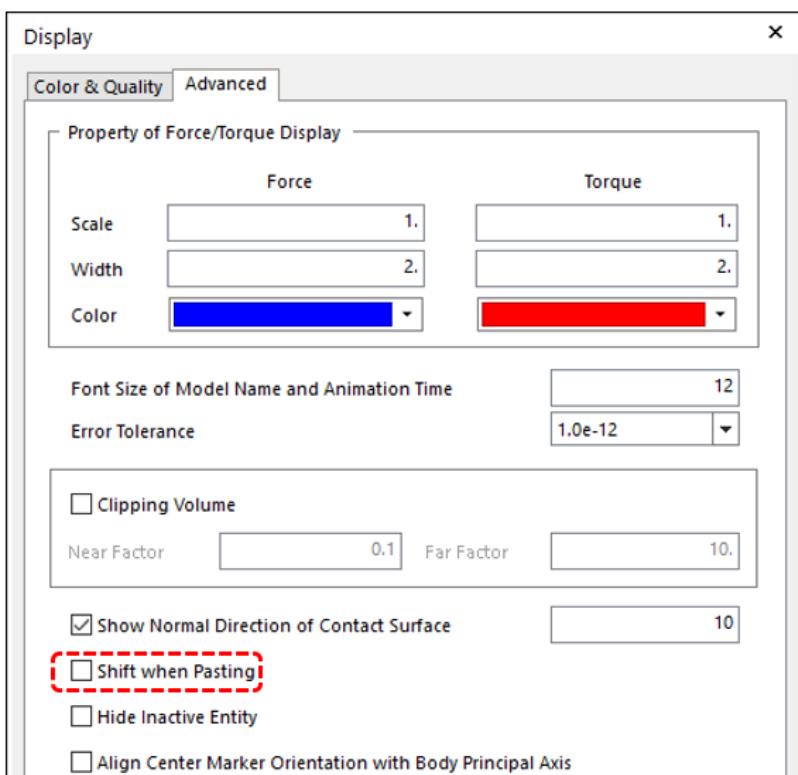


8. Geometry Tab > Solid and Marker > Link 아이콘 클릭 > 생성 옵션을 “Point,Point,Depth” 선택 > First Point로 (0,12.5,30)을 직접 입력 <Enter> > Second Point는 (0,12.5,100)을 직접 입력 <Enter> > Depth는 “6” 직접 입력 <Enter>로 Link1을 생성

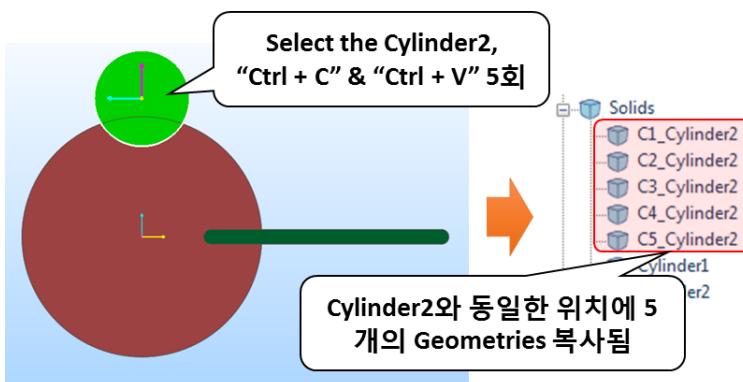
9. 7번 과정에서 생성한 Link1을 선택한 후 키보드 <P> 버튼을 눌러 Geometry 속성 대화창을 열고 First Radius와 Second Radius를 “3.1”로 입력 후 OK 버튼을 눌러 수정 완료



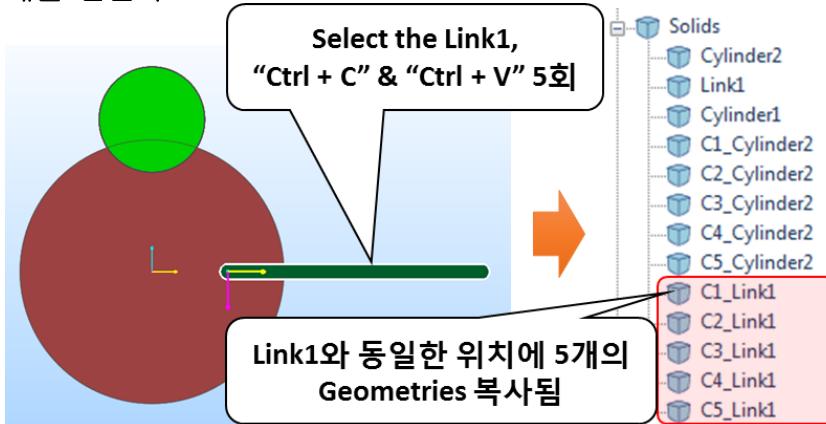
10. Body Edit Mode > Home Tab > Model Setting > Display 아이콘 클릭 → Display 대화 창에서 Advanced page 클릭 하단부의 “Shift when pasting” 옵션을 체크 해제한다.



11. Body Edit Mode 작업 창에서 Cylinder2 형상을 클릭하여 선택하고 <Ctrl + C> 키보드 버튼을 눌러 Cylinder2 형상을 복사한 뒤 바로 <Ctrl + V> 키보드 버튼을 5번 눌러 Cylinder2를 복사한 형상 5개를 만든다

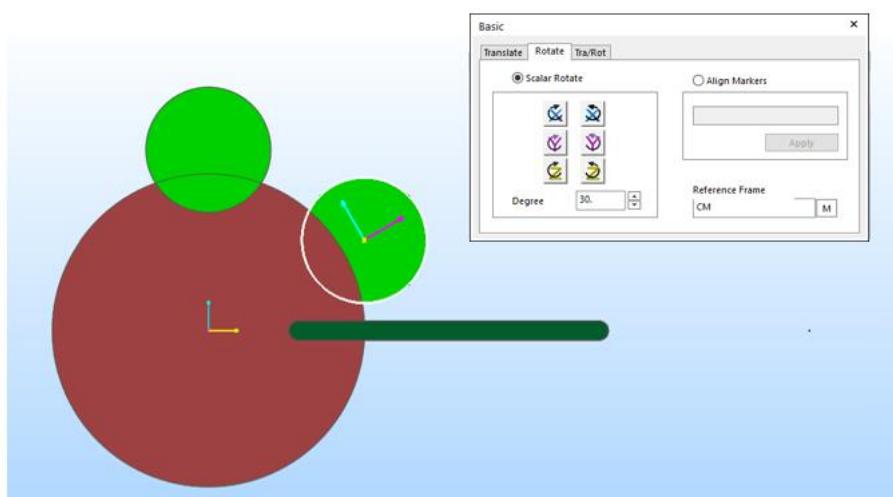


12. 10번의 과정과 같이 Link2 형상을 선택하고 <Ctrl + C> 키보드 버튼을 눌러 Link1 형상을 복사한 뒤 바로 <Ctrl + V> 키보드 버튼을 5번 눌러 Link1을 복사한 형상 5개를 만든다



13. View Control Toolbar > Object Control 아이콘 메뉴를 클릭 > 대화창을 열고, C1_Cylinder2 ~ C5_Cylinder2의 5개의 Geometry를 선택한다.

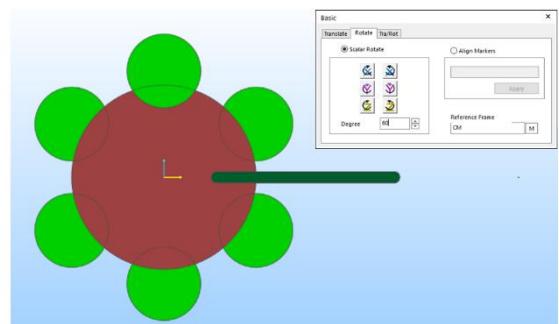
14. Object Control에서 Rotate page로 이동해서 Degree 입력란에 “60”을 입력하고 Y축 반시계 방향 아이콘을 한번 클릭한다.



15. 13번의 상태에서 C2_Cylinder2 ~ C5_Cylinder2의 4개의 Geometry를 선택한 뒤(데이터베이스 창에서 마우스로 Drag해서 선택하면 쉽게 선택 가능하다 or 모두 선택되어 있는 상태에서 Ctrl 버튼을 누른상태에서 마우스로 제거하고 싶은 형상의 이름을 데이터 베이스 창에서 한번 클릭하면 선택이 해제된다.),

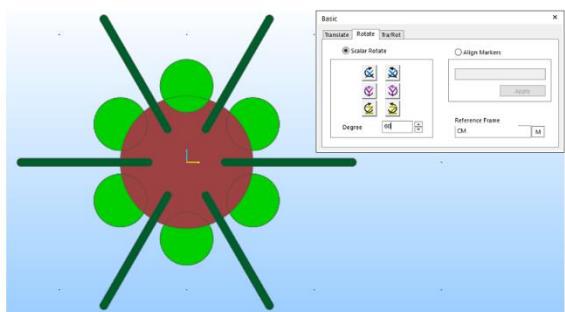
Object Control에서 Y축 반시계 방향

아이콘을 한번 클릭한다.



16. 14번 과정 이후 다시 Geometry를 하니씩 줄여서 선택하고 Object Control로 60도 회전시켜서 6개 Geometry가 모두 동일하게 60도 간격으로 위치될 때까지 위의 13, 14번 과정을 반복한다. 완료되면 다음과 같이 되어야 한다.

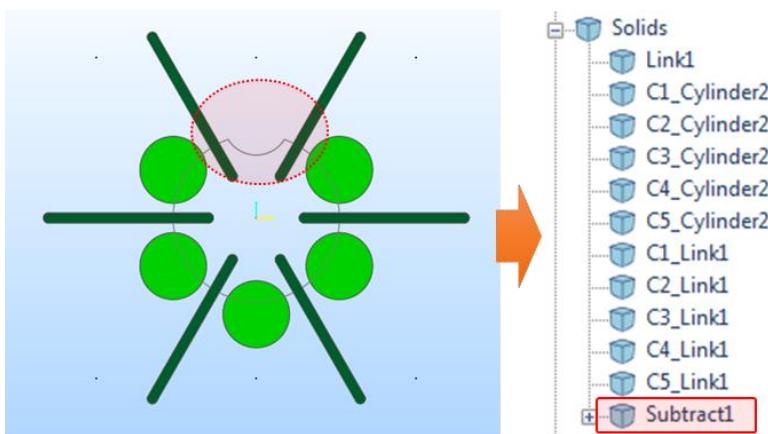
17. C1_Link1 ~ C5_Link1의 형상들도 12 ~ 15번의 동일한 과정을 수행하여 다음과 같이 60도 간격으로 위치하도록 위치를 조정한다.



18. Geometry Tab > Boolean 메뉴 > Subtract

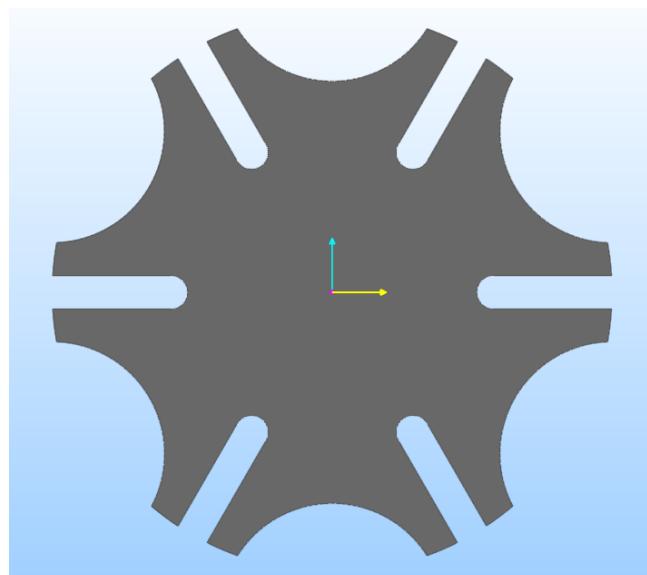
아이콘을 눌러 Subtract 명령을 실행시킨다. 이 후 작업 창에서 Cylinder1을 첫 번째 Solid로

선택하고, C1_Cylinder1을 두번째 Solid로 선택해서 Cylinder1에서 C1_Cylinder1을 형상을 빼낸다. 위의 동작을 실행하면 Cylinder1의 형상 이름이 Subtract1으로 변경됨을 데이터 베이스 창에서 확인할 수 있다.

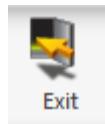


19. 17번의 과정을 C2_Cylinder1 ~ C5_Cylinder1과 C1_Link1 ~ C5_Link1의 모든 형상에 대해서 수행한다. 모두 수행하고 나면 아래의 그림과 같은 형상이 나타난다.

* 이때, <A> 키보드 버튼을 눌러 Auto Operation을 활성화하고 수행하면 좀더 편리하게 작업할 수 있고, 작업이 완료되면 <A>버튼을 한번 더 눌러 해제한다.



20. 위의 형상 작업이 완료되면 리본 메뉴 바에서 “Exit”



버튼을 눌러 Body Edit

Mode를 빠져 나온다. (또는 작업 창의 빈공간을 우클릭하고 팝업 메뉴에서 Exit 메뉴를 선택한다.)

21. 데이터 베이스에서 Body1을 선택하고 우클릭하여 “Rename”을 실행하고 바디 이름을 “Driven_Wheel”로 변경한다.

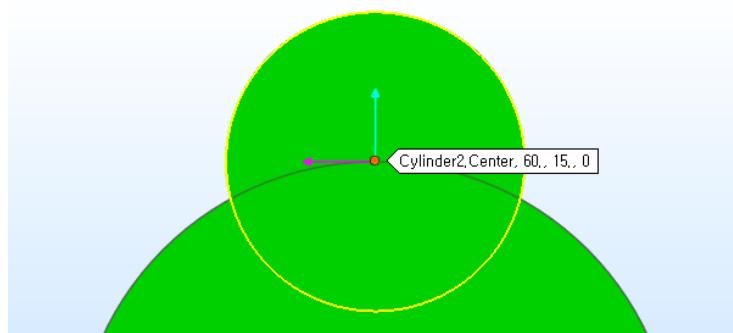
22. Professional Tab > Body 메뉴 > Cylinder 아이콘 클릭 > 생성옵션을 “Point,Point,Radius”를 선택 > 첫번째 Point로 (60,0,0)을 직접 입력 > 두 번째 Point로 (60,10,0)을 직접 입력 > Radius로 “50”을 입력하여 Body2를 생성한다.

23. Body2를 더블클릭하여 Body2의 Body Edit Mode로 진입한다.

24. Geometry > Cylinder 아이콘 클릭 > 생성옵션을 “Point,Point,Radius”를 선택 > 첫번째 Point로 (60,10,0)을 직접 입력 > 두 번째 Point로 (60,15,0)을 직접 입력 > Radius로 “20.685”을 입력하여 Cylinder2 형상을 추가한다.

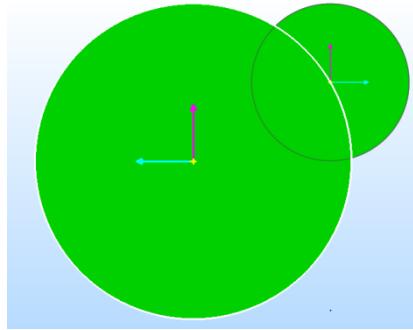
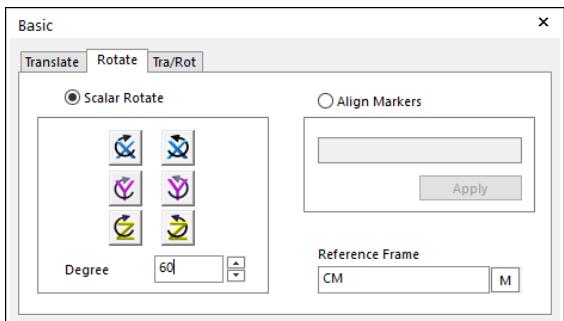
25. Geometry > Cylinder 아이콘 클릭 > 생성옵션을 “Point,Point,Radius”를 선택 > 첫번째 Point로 (18.4,10,0)을 직접 입력 > 두 번째 Point로 (18.4,15,0)을 직접 입력 > Radius로 “41.6”을 입력하여 Cylinder3 형상을 추가한다.

26. Geometry > Marker 아이콘 클릭 > 작업창의 Cylinder2의 외곽선 부분을 마우스로 Navigation하면 Circle의 중심점에 포인트가 위치될 때 클릭하여 중심점에 마커 생성
※ 작업평면을 ZX로 선택해야 아래와 같이 마커의 자세로 생성된다.

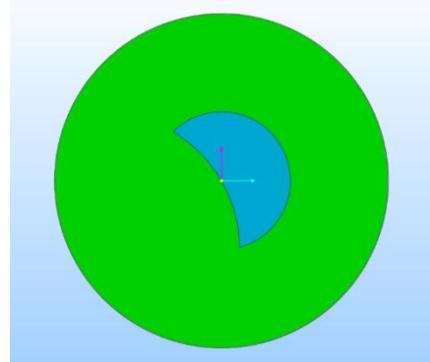


27. View Control Toolbar > Object Control 아이콘 클릭 > Rotate Page로 이동 > Degree “60”입력 > Reference Frame란에 25번과정에서 생성한 마커를 데이터 베이스 창의 Reference Frame에 Drag&Drop으로 입력

28. Cylinder3 형상을 선택한 뒤, Object Control의 Z축 시계방향 아이콘을 한 번 클릭. 다음 과 같이 Cylinder3의 위치를 변경



29. Body Edit Mode에서 Geometry Tab > Boolean 메뉴 > Subtract 아이콘을 눌러 Subtract 명령을 실행시킨다. 이후 작업 창에서 Cylinder2를 첫 번째 Solid로 선택하고, Cylinder3를 두 번째 Solid로 선택해서 Cylinder2에서 Cylinder3를 형상을 빼낸다. 위의 동작을 실행하면 Cylinder2의 형상 이름이 Subtract1으로 변경됨을 데이터 베이스 창에서 확인할 수 있다.



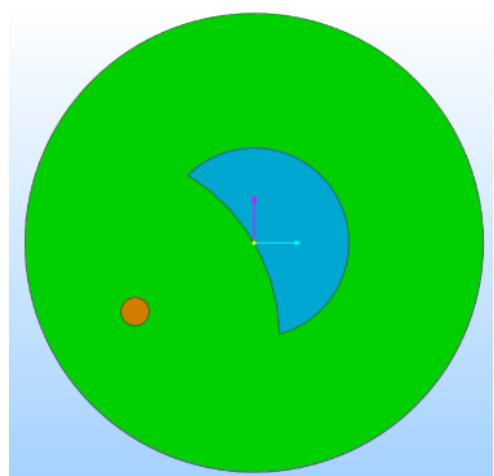
30. Body Edit Mode에서 Geometry > Cylinder 아이콘 클릭 > 생성옵션을 “Point,Point,Radius”를 선택 > 첫번째 Point로 (30,10,0)을 직접 입력 > 두 번째 Point로 (30,15,0)을 직접 입력 > Radius로 “3.05”을 입력하여 Cylinder4 형상을 추가한다.

31. View Control Toolbar > Object Control 아이콘 클릭 > Rotate Page로 이동 > Degree “60”입력 > Reference Frame란에 25과정에서 생성한 마커를 데이터 베이스 창의 Reference Frame에 Drag&Drop으로 입력

32. Cylinder4 형상을 선택한 뒤, Object Control의 Z축 시계방향 아이콘을 한 번 클릭. 작업이 완료되면 우측과 같은 형상 모델링이 완성된다.

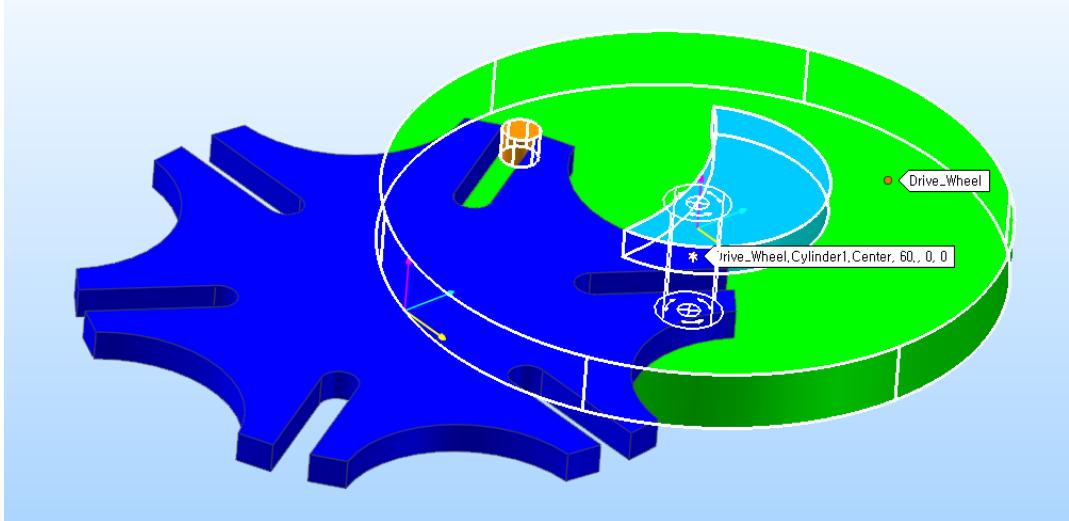
33. Exit 아이콘을 눌러 Body Edit Mode를 나온다.

34. Body2의 이름을 “Drive_Wheel”로 변경

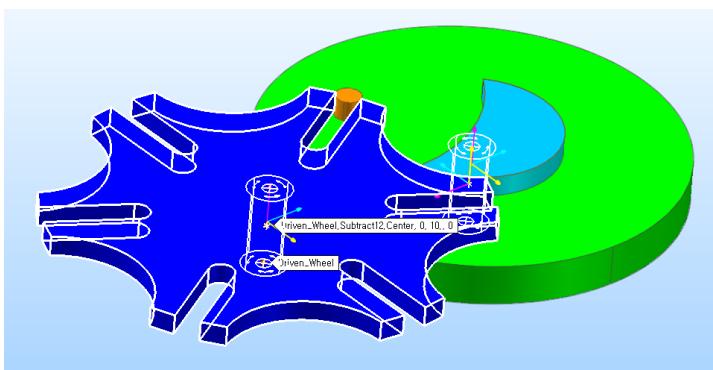


STEP 2 Geneva Wheel 조인트 모델링

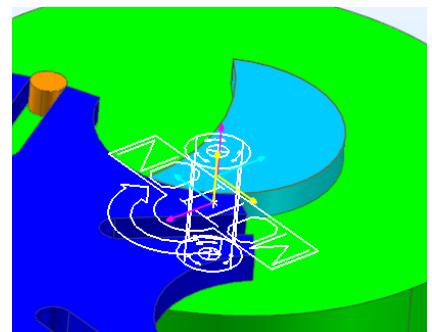
1. Professional Tab > Joint 메뉴 > Revolute Joint 아이콘 클릭 > 생성옵션 “Body,Body,Point,Direction” 선택 > 작업창에서 Ground 클릭 > Drive_Wheel 클릭 > Point는 (60,0,0)을 직접 입력 (or Drive_Wheel 바디의 Cylinder1 형상의 아래 Circle 부의 마우스를 가져가면 Circle Center로 (60,0,0)이 Navigation될 때 클릭) > Direction은 (0,1,0)을 직접 입력 → RevJoint1 생성



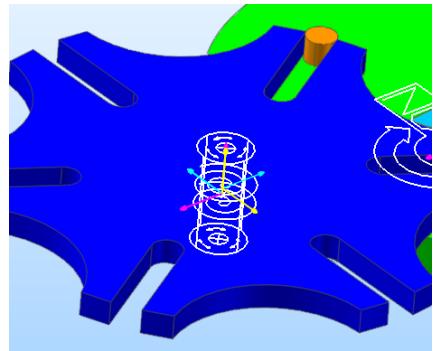
2. Professional Tab > Joint 메뉴 > Revolute Joint 아이콘 클릭 > 생성옵션 “Body,Body,Point,Direction” 선택 > 작업 창에서 Ground 클릭 > Driven_Wheel 클릭 > Point는 (0,10,0)을 직접 입력 > Direction은 (0,1,0)을 직접 입력 → RevJoint2 생성



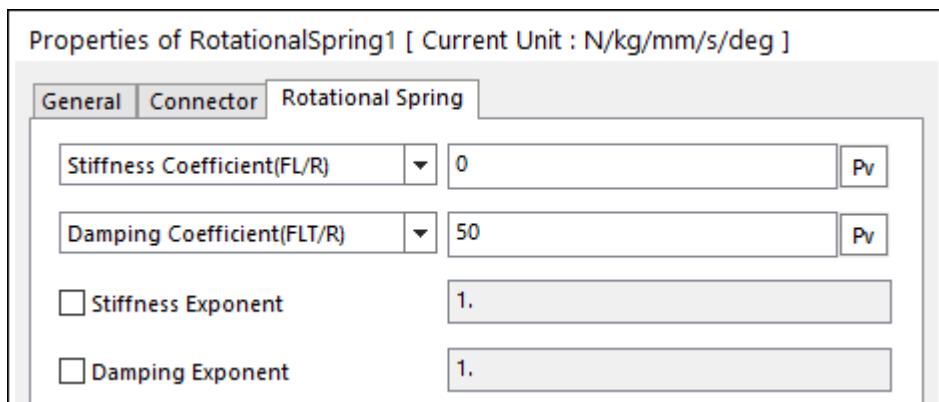
3. RevJoint1의 Property 대화 창을 열다 > “Include Motion” 옵션 체크 > Motion 버튼 클릭 > Motion Type 을 Velocity로 선택 > EL 버튼 클릭 > Expression List에서 Create 버튼 클릭 > Expression Edit 창에서 > “360D” 입력 > OK > OK > OK > OK



4. Professional Tab > Force 메뉴 > Rotational Spring 클릭
> 생성 옵션 “Joint”선택 > 작업 창에서 RevJoint2를 선택
(※ Driven 축의 저항을 모델) ➔ Rot.Spring1생성

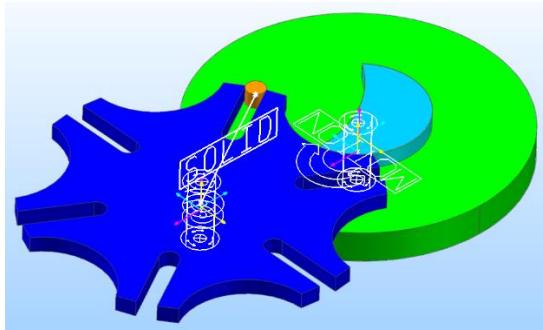


5. Rot.Spring1의 대화창을 열고 Stiffness Coefficient = 0,
Damping Coefficient = 50 입력후 OK

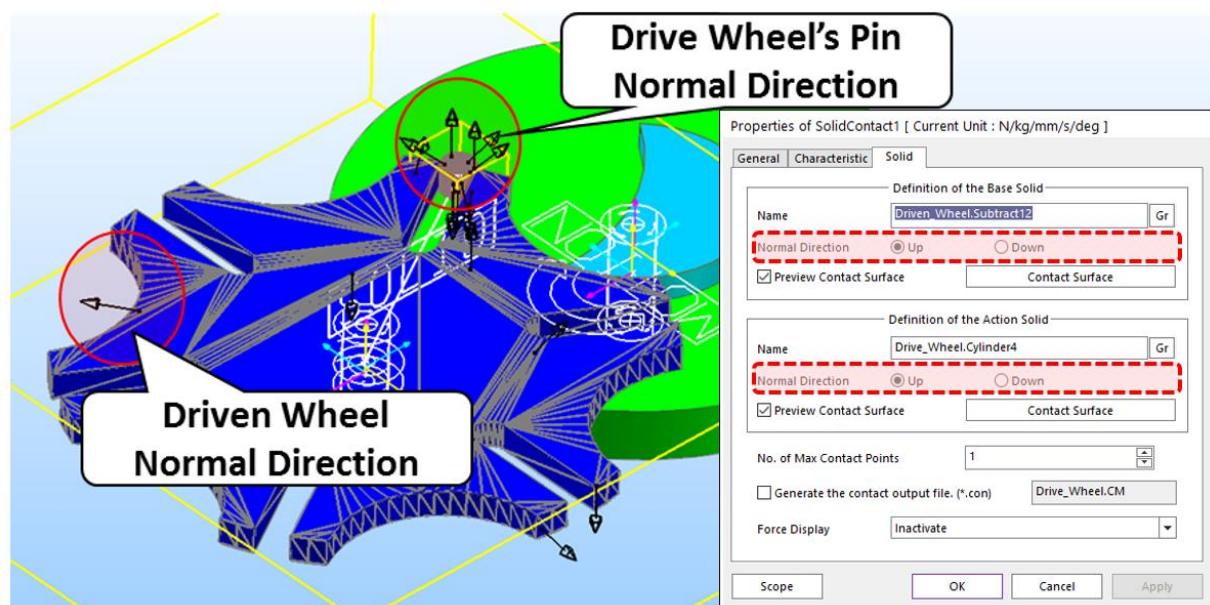


STEP 3 Geneva Wheel의 Solid Contact을 이용한 접촉 모델링

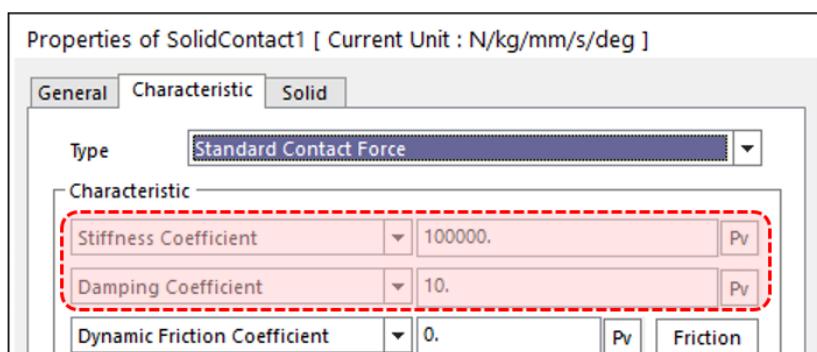
- Professional Tab > Contact 메뉴 > Solid Contact 아이콘 선택 > Driven_Wheel 바디 선택 > Drive_Wheel 바디의 Pin 형상(Body Edit Mode의 Cylinder4)를 선택 → Solid Contact을 생성한다.



- SolidContact1을 선택하고 대화 창을 열어서 Normal Direction을 작업 창과 비교하면서 확인한다. 접촉면의 외측으로 화살표가 표시되어야 접촉 계산이 올바르게 진행된다.



- 대화창의 Characteristic page에서 Spring Coeff와 Damping Coeff를 확인한다. 우선, 기본 값을 사용하면 해석 후 동영상 결과에서 두 바디가 서로 많이 침투되어 해석이 되면 다시 Spring Coeff의 값을 높여 재해석을 수행한다.



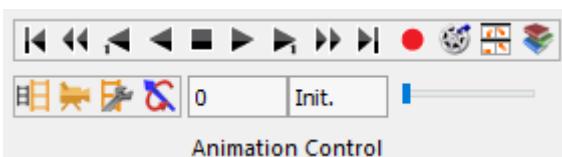
STEP 4 해석 및 결과 확인

1. Dynamic Simulation 버튼  을 누름 → Dynamic/Kinematic Analysis 창이 열림

2. End Time에 6를 입력하고 Step은 600을 입력 후 Simulate 버튼을 누름

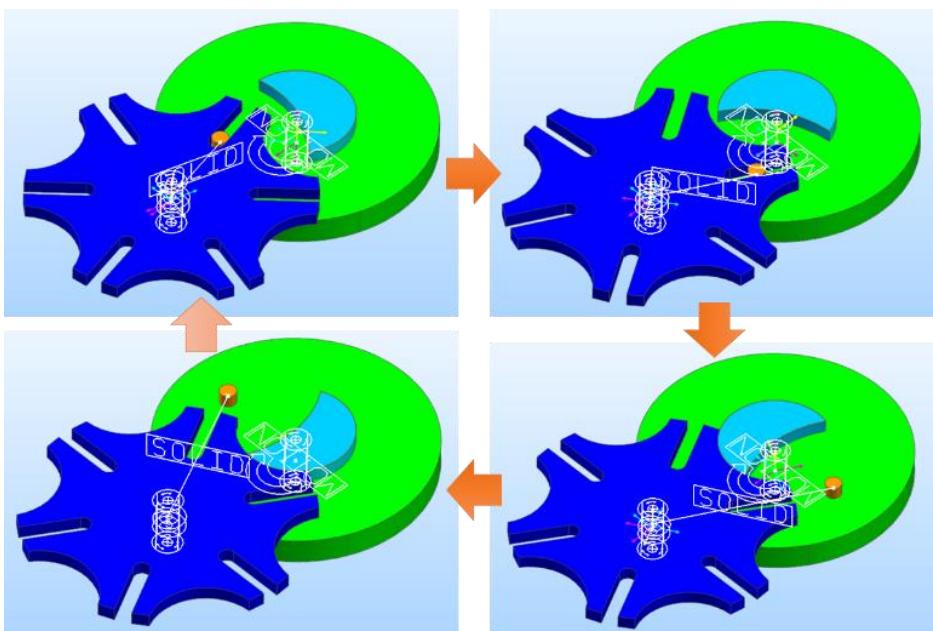
- End Time: 6
- Step: 600

3. 아래 그림과 같이 Analysis > Animation Control > Play 아이콘 등의 메뉴를 이용하여 모델의 작동 상태를 동영상으로 확인해 본다.



4. 동영상을 한 프레임씩 넘기면서 동영상 결과를 정밀히 확인하고자 할 때,  “Increase One Frame”와 “Decrease One Frame” 버튼을 한번씩 클릭하면서 동영상 결과를 확인한다.

* 모델이 정확하게 생성되었다면 다음과 같이 동작한다.

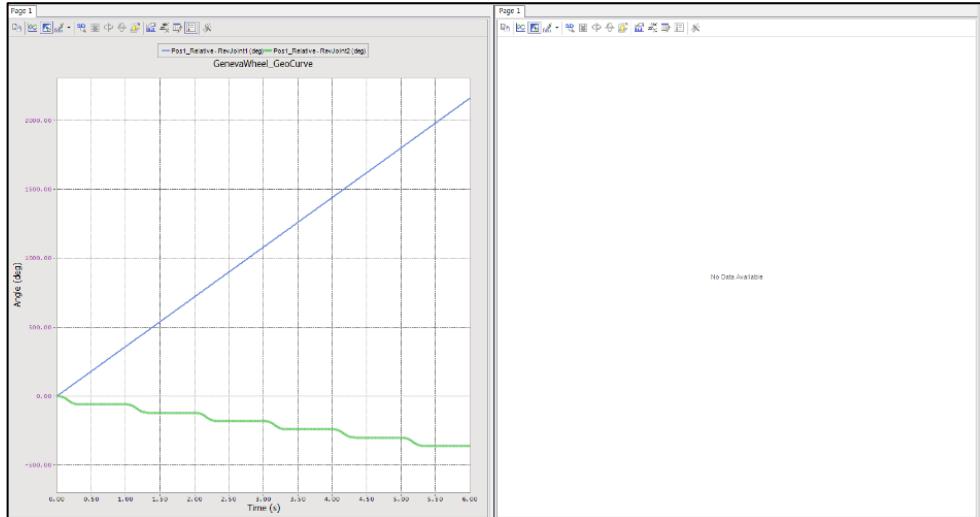


5. Analysis Tab > Plot 메뉴 > Plot 아이콘  버튼을 눌러 Plot window을 실행함

6. “Show Upper Windows” 메뉴를 선택하여 Plot Window의 창을 좌우 2개로 분할되도록 설정

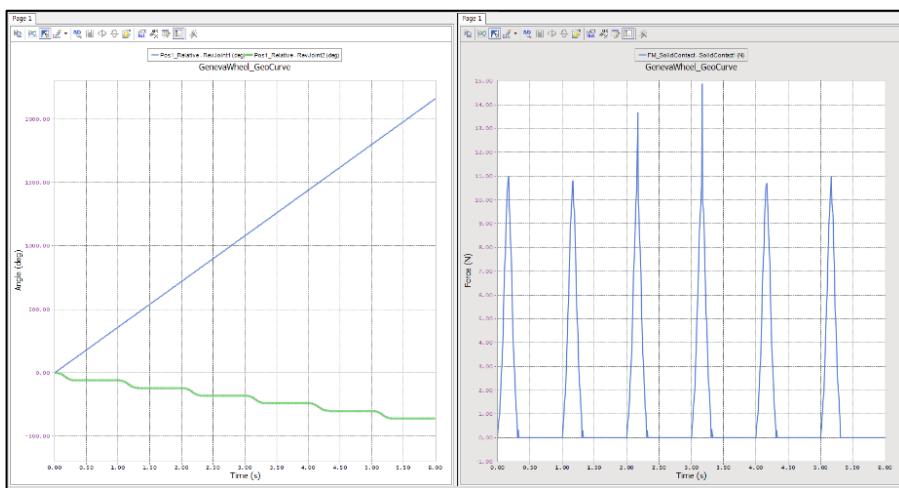
7. 좌측 창을 마우스로 눌러 선택하고 Plot database창에서 다음의 두 항목을 더블클릭하여 그 래프를 그려서, 두 바디의 회전 각도를 확인 및 분석한다.

- JointsW RevJoint1W Pos1_Relative
- JointsW RevJoint2W Pos1_Relative



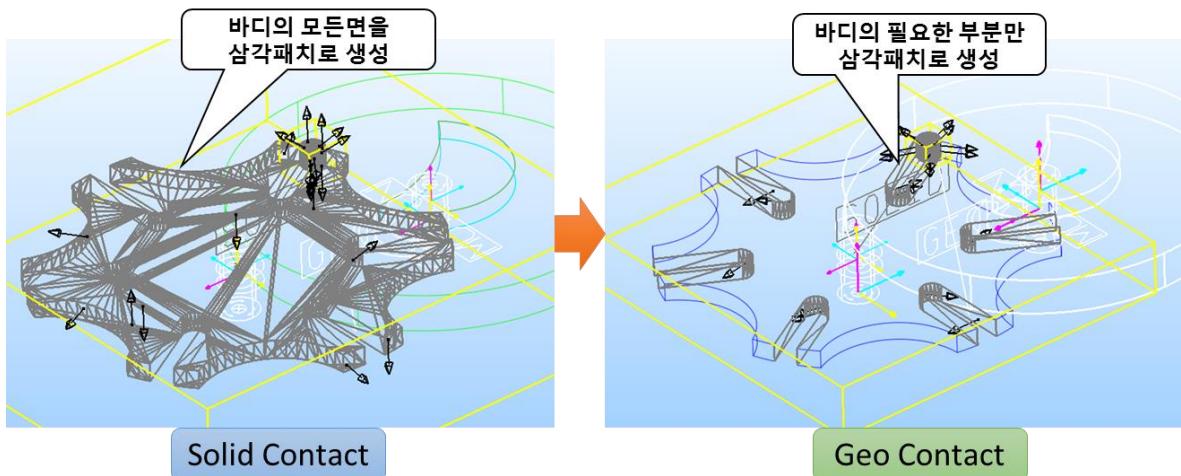
* Drive 조인트의 1회전당(파란색선) Driven 조인트의 1/6회전(녹색선)이 된 것을 수치 결과를 확인할 수 있다. 이는 Drive 바디의 Pin이 1회전하면서 Driven Wheel의 훌을 따라 60 도만큼 회전 운동이 일어나기 때문이다.

8. 우측 창을 마우스로 눌러 선택하고 Plot database창에서 ContactW Solid ContactW Solid Contact1W FM_SolidContact 항목을 더블클릭하여 그래프를 그려서, Driven Wheel 바디와 Drive 바디의 Pin(Cylinder4형상)이 접촉할 때의 접촉력을 그래프로 확인한다.

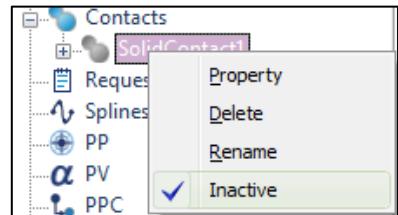


STEP 5 Geneva Wheel의 Geo Contact을 이용한 접촉 모델링

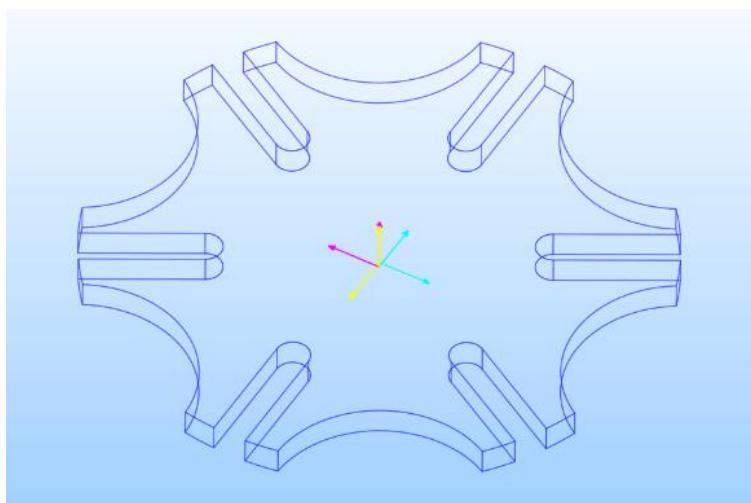
※ Solid Contact의 장점은 별다른 사전 작업 없이 두 바디 사이에 접촉을 정의 및 해석할 수 있다. 하지만, 접촉하는 바디의 형상이 다소 복잡하게 되어 있다면, 모든 면을 삼각패치로 생성하는 Solid Contact의 경우, 많은 접촉 계산을 요구하는 경우가 발생하여 해석 속도가 기대보다 느려지는 경우가 모델에 따라 나타날 수 있다. 이러한 경우, 접촉 요소를 Surface 계열의 다른 접촉 요소로 변경하고 접촉이 실질적으로 일어나는 부분만을 접촉면으로 정의하여 해석을 수행하면 해석 성능을 향상 시킬 수 있다. 이러한 방법을 STEP 5의 과정을 통해 살펴보겠다.



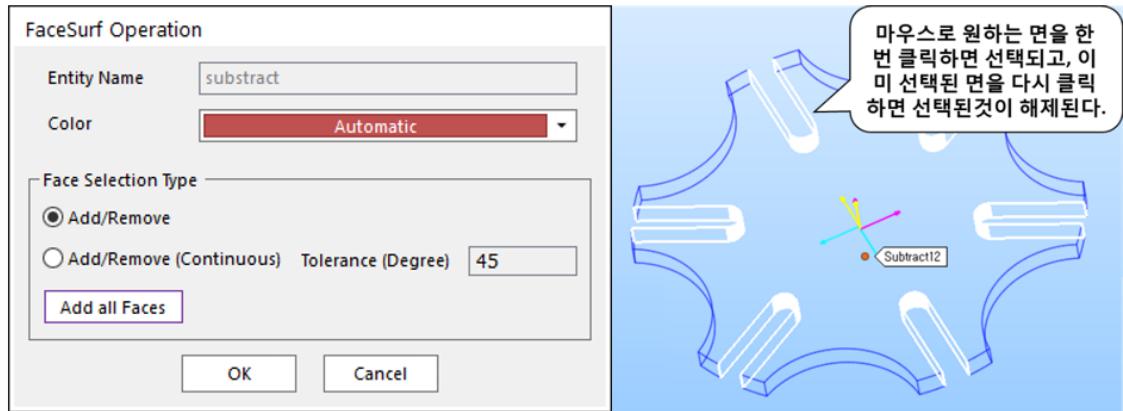
- 데이터 베이스 창에서 기존 생성한 SolidContact1을 우클릭하고 ‘Inactive’를 선택하여 접촉을 모델에서 비활성화 한다.



- Driven_Wheel 바디를 더블클릭하여 Driven_Wheel의 Body Edit Mode로 진입한다.

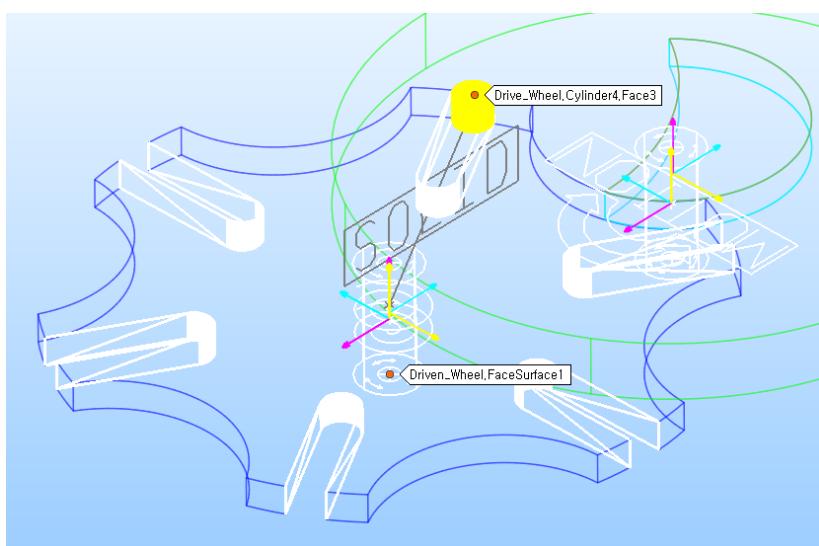


3. Body Edit Mode에서 Geometry Tab > Surface 메뉴 > Face Surface > Solid, MultiFace 생성옵션 선택 > 아래 그림과 같이 Drive_Wheel 바디의 Pin 형상이 접촉하는 부위의 Surface만 마우스로 클릭하여 모두 선택한다. 작업 창을 View Control의 “Rotation”기능을 이용(단축키 <R> 키보드 버튼) 바디를 회전하면서 모두 선택하고(ctrl 또는 shift키를 누른 상태에서) 대화 창의 OK버튼을 누른다.



4. 데이터 베이스에 “FaceSurface1”이 생성된 것을 확인 한 후, Exit 버튼을 눌러 Body Edit Mode에서 빠져 나온다.

5. Professional Tab > Contact 메뉴 > Geo Contact 아이콘  을 클릭 > 생성옵션 “Surface(PatchSet), Surface(PatchSet)” 선택 > 4번 과정에서 생성한 Driven_Wheel의 FaceSurface1 위로 마우스를 이동하여 선택 > Drive_Wheel의 Pin 형상에서 원통 옆면 위로 마우스를 이동하고 선택하여 GeoSurfContact1을 생성



6. 생성된 GeoSurfContact1의 Property 대화 창을 열고 Normal Direction의 화살표가 접촉 면의 바깥쪽으로 향하는지 확인하고 OK 버튼을 눌러 닫음

STEP 6 Geo Contact 모델 해석 및 결과 확인

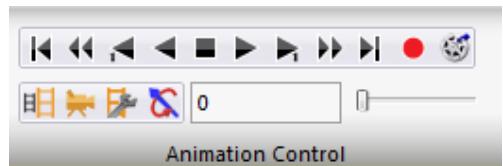
1. Dynamic Simulation 버튼  을 누름 → Dynamic/Kinematic Analysis 창이 열림

2. End Time에 6를 입력하고 Step은 600을 입력 후 Simulate 버튼을 누름

- End Time: 6
- Step: 600

3. 오른쪽 그림과 같이 Analysis > Animation

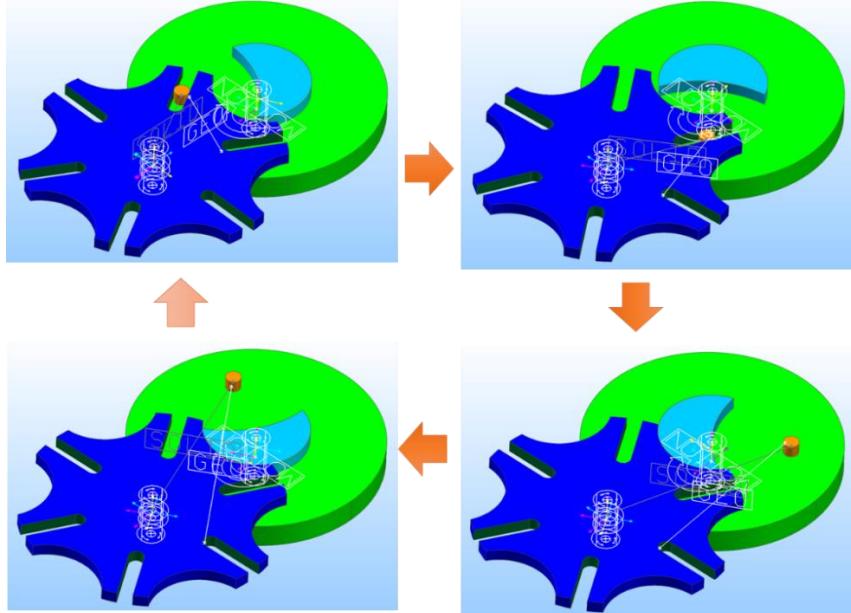
Control > Play 아이콘 등의 메뉴를 이용하여 모델의 작동 상태를 동영상으로 확인해 본다.



4. 동영상을 한 프레임씩 넘기면서 동영상 결과를 정

밀히 확인하고자 할 때,  “Increase One Frame”와 “Decrease One Frame” 버튼을 한 번씩 클릭하면서 동영상 결과를 확인한다.

* 모델이 정확하게 생성되었다면 다음과 같이 동작한다.

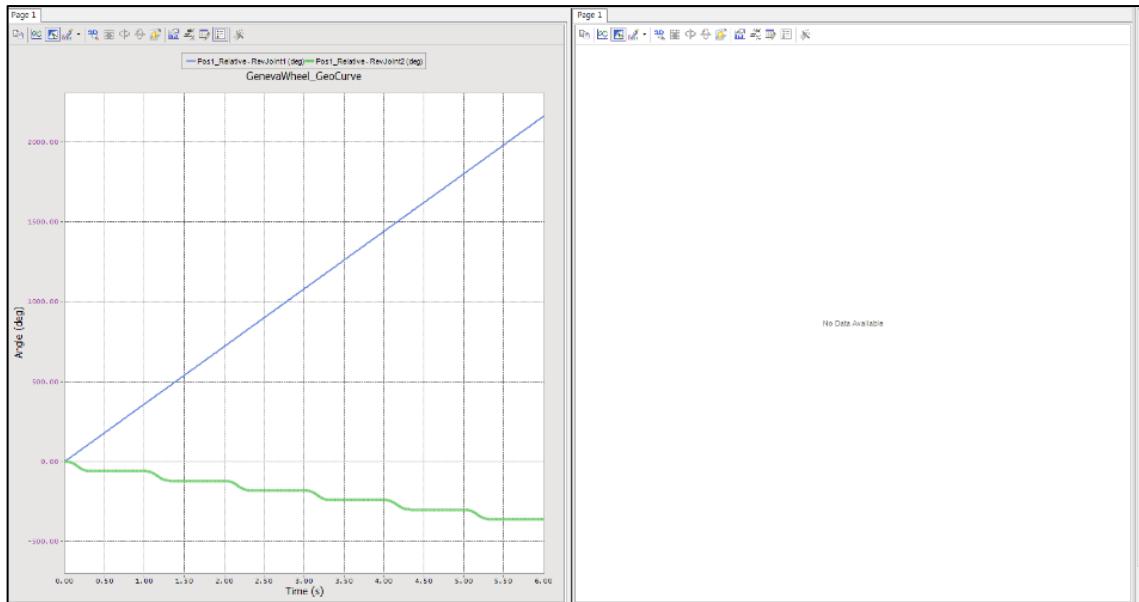


5. Analysis Tab > Plot 메뉴 > Plot 아이콘  버튼을 눌러 Plot window을 실행함

6. Window 버튼  의 하단에 있는 window 글자 부분을 누르고 “Show Upper Windows” 메뉴를 선택하여 Plot Window의 창을 좌우 2개로 분할되도록 설정

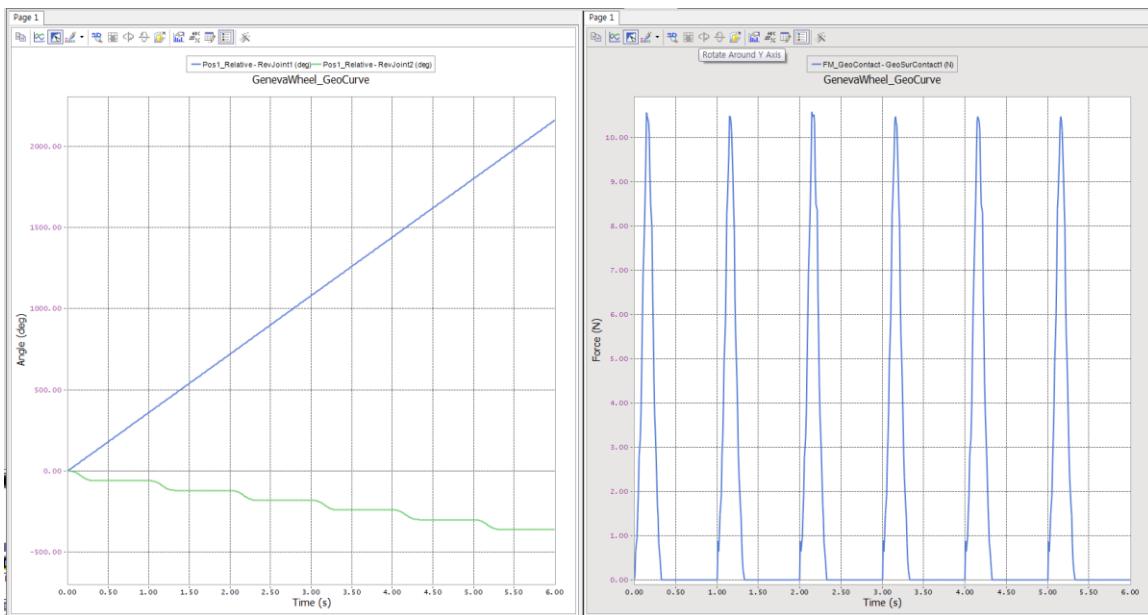
7. 좌측 창을 마우스로 눌러 선택하고 Plot database창에서 다음의 두 항목을 더블클릭하여 그 래프를 그려서, 두 바디의 회전 각도를 확인 및 분석한다.

- JointsW RevJoint1W Pos1_Relative
- JointsW RevJoint2W Pos1_Relative



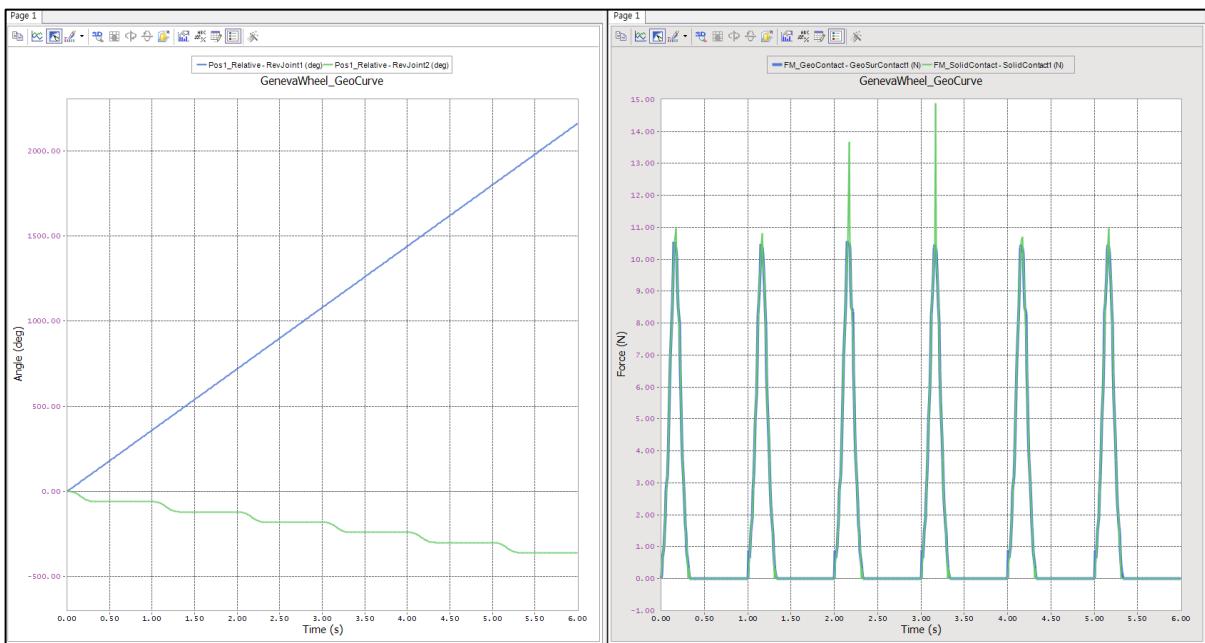
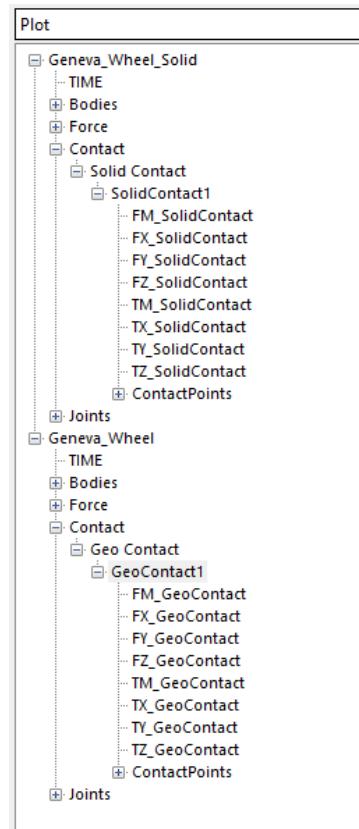
8. ※ Drive 조인트의 1회전당(파란색선) Driven 조인트의 1/6회전(녹색선)이 된 것을 수치 결과를 확인할 수 있다. 이는 Drive 바디의 Pin01 1회전하면서 Driven Wheel의 훌을 따라 60도만큼 회전 운동이 일어나기 때문이다.

9. 우측 창을 마우스로 눌러 선택하고 Plot database창에서 ContactW Solid ContactW Solid Contact1W FM_SolidContact 항목을 더블클릭하여 그래프를 그려서, Driven Wheel 바디와 Drive 바디의 Pin(Cylinder4형상)이 접촉할 때의 접촉력을 그래프로 확인한다.



10. Solid Contact의 결과와 Geo Contact의 결과를 상호 비교를 위해 현재 열려진 Geneva_Wheel.rplt 파일에 STEP 4에서 생성한 Solid Contact의 Genenva_Wheel.rplt결과를 현재의 Plot window에 Import기능을 이용해서 불러 들어온다. Import되면 데이터 베이스에 결과 트리가 두개가 등록된 것을 확인할 수 있다.

11. 우측 Plot창을 선택하고 Geneva_Wheel의 SolidContact > FM_SolidContact 결과 항목을 더블클릭해서 GeoSurfContact 결과와 겹쳐서 그래프를 그려본다.
※ 결과값이 대부분의 시간 구간에서 거의 동일하게 나타남을 확인할 수 있다.



Chapter 10. Expression and Request

Lecture:

Expression에 대한 Expression 활용방법을 이해하고 이를 이용하여 Request를 이용한 해석결과의 추출방법을 익힌다.

Workshop

None



소요 시간

강의명	시간(분)
Expression 설명	30 분
Request 설명	10 분
총합	40 분

1. Expression

RecurDyn의 Expression은 함수를 만들 수 있는 기능이다. 복잡한 다물체시스템을 모델링 하기 위해서 기본적으로 제공되는 다물체동역학 모델링 요소인 바디, 조인트, 힘, 접촉 요소 이외에도 수학적 모델의 함수를 추가 해야 할 상황이 발생한다. 이러한 수학적 모델을 표현하기 위한 상황에서 함수를 생성 및 모델링 할 수 있는 기능이 바로 RecurDyn의 Expression이다. 또한, 사용자가 필요한 결과 출력이 기본으로 제공되는 항목 이외의 수학적 함수를 사용해야 표현이 가능한 경우에도 Expression 기능이 사용된다. 실제 모델링에서 사용되는 경우는 다음과 같다.

- 모델링을 위한 Parametric 수식을 구현할 경우
- 힘 요소를 이용한 복잡한 외력을 시스템에 정의할 경우
- 조인트의 복잡한 모션을 함수 식으로 표현하고자 할 경우
- 시간에 따른 해석조건의 변화를 구현할 경우
- 사용자 임의적 출력을 수학적 함수 식 등으로 표현할 경우

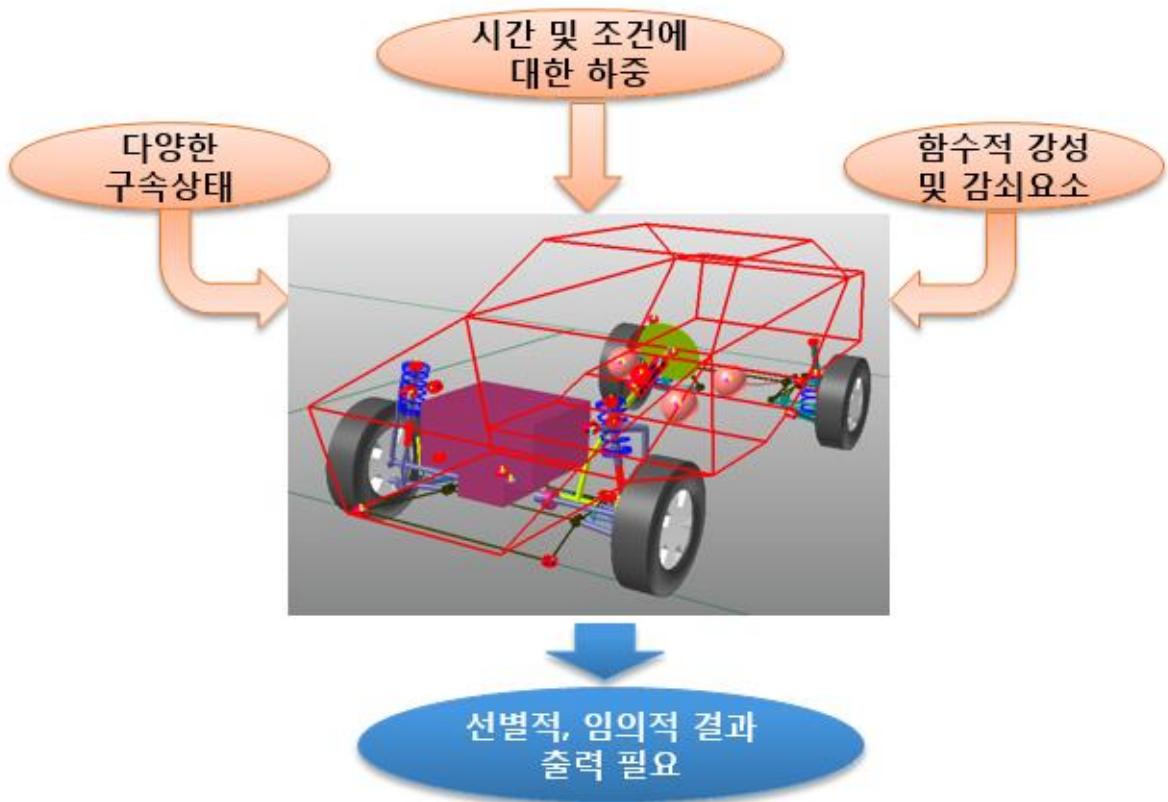


Figure 149 Expression의 필요성

1) Expression의 용도

Expression의 용도는 GUI부터 Solver까지 다양하게 사용된다. 특히 Solver에 있어서 힘, 모션, 해석결과 출력등 다양하게 사용되므로 반드시 알아야 할 기본기능이라 할 수 있다. 뿐만 아니라 Expression을 이용한 Parametric Modeling기능을 사용할 때 반드시 필요하다.

(1) 모델링을 위한 Parametric 수식을 구현할 경우

Parametric Modeling을 위해 Parametric Point와 Parametric Value를 주로 사용하게 된다. 그러나 이러한 좌표나 값은 그냥 단순한 변수에 지나지 않으며, 다양한 수치 값에 대한 상호 관계는 Expression을 통해서 정의할 수 있다. 아래 그림은 Expression을 이용하여 x, y직교좌표를 원통좌표계로 Parameterize하는 과정을 보여준다.

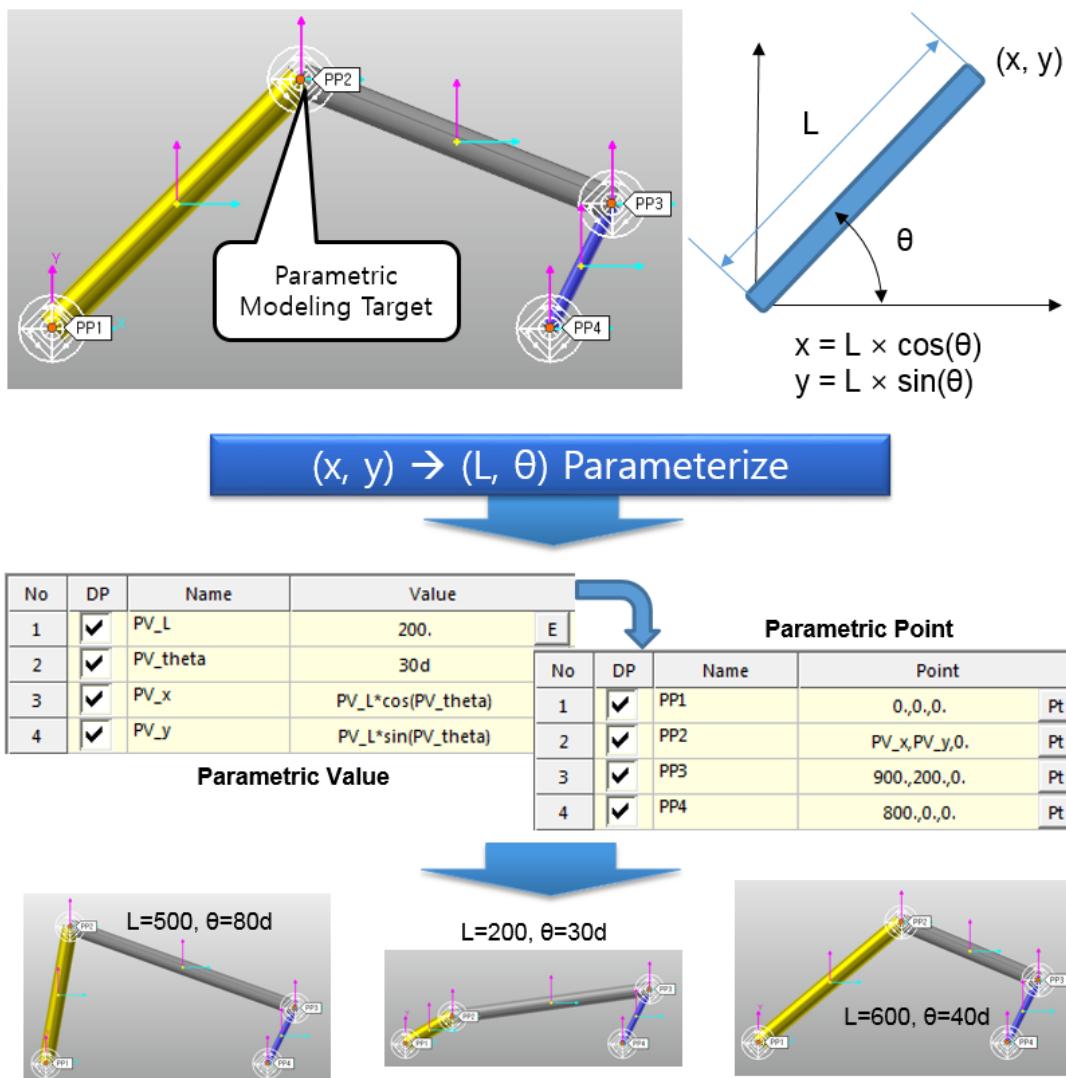


Figure 150 Expression을 이용한 parametric 모델링

(2) 힘 요소를 이용한 복잡한 외력을 시스템에 정의할 경우

다물체동역학에서 외력은 정적 상태의 힘이 아닌 시간에 대한 또는 상태에 대한 비선형적 거동을 나타내는 하중이다. 따라서 이러한 하중을 수학적으로 모델링 하고 이를 모델에 입력하는 과정이 필요하다. Expression은 다양한 수학적 함수와 RecurDyn내장함수를 이용하여 하중에 대한 모델링이 가능하다. 아래는 스프링과 댐퍼 모델을 Expression을 통해 구현한 것이다.

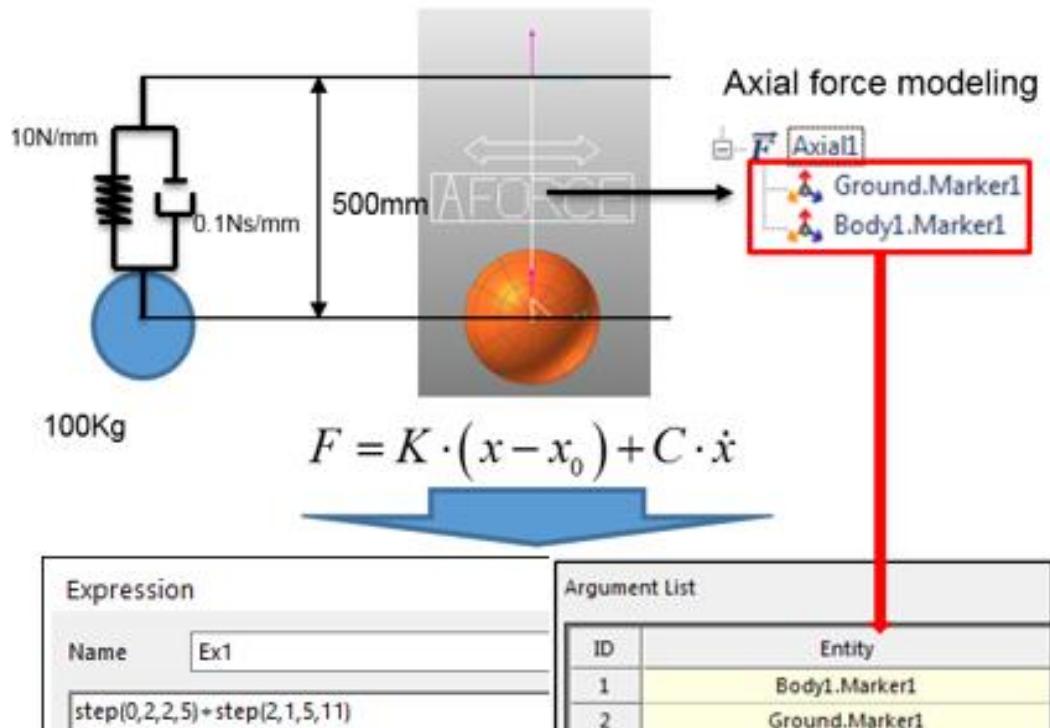


Figure 151 Expression을 이용한 스프링 댐퍼 모델링

(3) 조인트의 복잡한 모션을 함수 식으로 표현하고자 할 경우

모션에 대한 함수의 사용은 이미 언급한 바가 있다. 조인트모션 또는 CMotion을 이용하여 특정 Body를 원하는 Profile대로 움직이고자 할 때 사용된다. 이 때 반드시 지켜야 할 사항은 Motion함수가 시간에 대해 미분가능 한 함수이어야 한다. 위치가 갑자기 큰 값으로 변동하게 되면 큰 변위를 일으킬 수 있는 가속도가 필요하고 이 가속도는 다시 Joint의 Reaction Force와 연관이 있다. 물리적으로 만들 수 없는 가속도 혹은 Reaction Force는 해석에서 오류를 일으킨다.

(4) 시간에 따른 해석조건의 변화를 구현할 경우

시간에 대한 해석조건이 변하는 경우를 구현할 때 가장 좋은 예는 Joint의 풀림 상태이다. 즉, 조인트가 일정 시간이 후 파손되는 상황을 해석할 경우 2가지 방법으로 수행 할 수 있는데. 그 첫 번째 방법이 Expression을 이용한 Force요소의 강성제거이다. Joint의 강성을 구속방정식이 아닌 Force요소로 모델링 할 수 있으며 이 요소가 특정 조건 또는 특정 시간에서 파손되는 상황을 구현하기 위해 Expression을 사용할 수 있다.

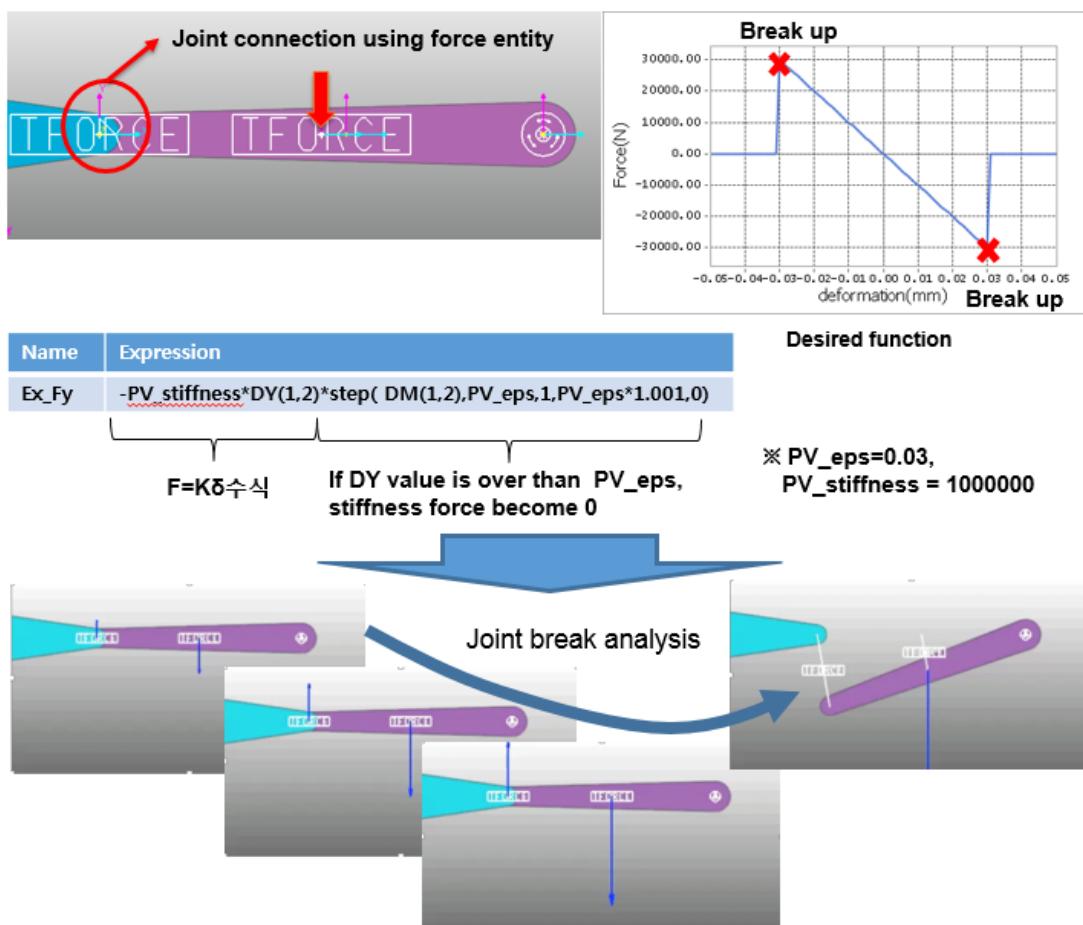
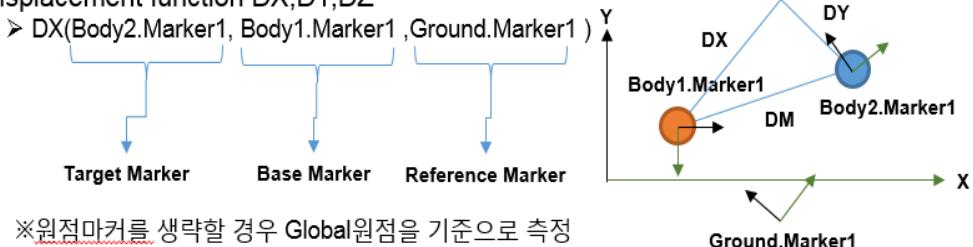


Figure 152 Expression을 이용한 joint break모델링

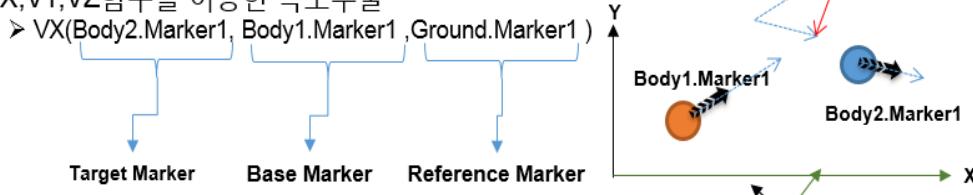
(5) 사용자 임의적 출력을 수학적 함수 식 등으로 표현할 경우

Expression의 또 다른 사용 용도가 바로 Request이다. 해석 중 발생하는 다양한 출력 결과를 한번에 모두 출력하는 것은 동역학 해석에서 매우 위험하고 어려운 문제이다. 이는 시간에 대한 해석이므로 결과의 양이 매우 방대하기 때문이다. 따라서 일반적인 출력 결과는 상당히 제한적이며, 이에 따라 특수한 출력결과를 만들 수 있어야 한다. 모델이 가지고 있는 다양한 해석 결과를 추출하는 방법을 아래의 그림에 나타내었다.

- Displacement function DX,DY,DZ



- VX,VY,VZ함수를 이용한 속도추출



- ACCX,ACCY,ACCZ함수를 이용한 가속도추출

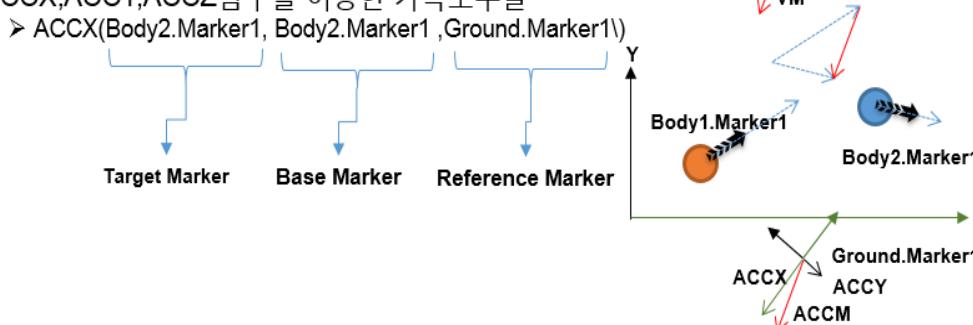


Figure 153 Expression을 이용한 해석결과 추출 함수

2) Expression 특징

RecurDyn Expression의 특징을 요약하면 다음과 같다.

- 쉽고 간편한 UI 및 Fortran 계산 함수 사용 가능
- 텍스트 편집을 통해 생성 및 편집 수정이 용이
- Argument List를 이용한 수식의 명료함과 편의성
- 독립적 개체로서 중복 사용 및 재사용 가능하며 독립적으로 수정 가능
- 함수의 초기 계산 값을 Expression List 대화 창에서 바로 확인 가능

3) Expression의 종류

(1) OPERATORS

산술연산자		관계연산자
+	더하기	< Is less than 1.0 < 2.0, return the value 1 2.0 < 1.0, return the value 0
-	빼기	<= Is less than or equal to 1.0 <= 2.0, return the value 1 2.0 <= 1.0, return the value 0
*	곱하기	= Is equal to A=B, return the value 1(If A-B < IF Tolerance) A=B, return the value 0(If A-B >= IF Tolerance)
/	나누기	> Is greater than 1.0 > 2.0, return the value 0 2.0 > 1.0, return the value 1
**	거듭제곱	>= Is greater than or equal to 1.0 >= 2.0, return the value 0 2.0 >= 1.0, return the value 1
논리연산자		<> Is not equal to A <> B, return the value 0(If A-B < IF Tolerance) A <> B, return the value 1(If A-B >= IF Tolerance)
		Logical OR
		&& Logical AND

(2) FORTRAN Functions

함수	기능
ABS	절대값
ACOS	Arccosine함수
AINIT	입력 값보다 작은 정수로 반환
ANINT	입력 값과 가까운 정수로 반환
ASIN	Arcsine함수
ATAN	Arctangent함수 ex) <u>atan</u> (x/y)
ATAN2	Arctangent2함수 ex) <u>atan2</u> (x,y)
COS	Cosine 함수
COSH	Hyperbolic cosine함수
DIM	두 값의 차가 음이면 0 양이면 반환
EXP	자연로그e의 지수계산
LOG	Log e계산
LOG10	Log 10계산
MAX	2개 또는 3개의 입력 값 중 큰 값 반환
MIN	2개 또는 3개의 입력 값 중 작은 값 반환
MOD	두 값의 나누기 연산의 나머지 반환
SIGN	x가 y의 부호를 따르도록 반환 sign(x,y)
SIN	Sine 함수
SINH	Hyperbolic sine함수
SQRT	제곱근 값
TAN	Tangent함수
TANH	Hyperbolic tangent함수

(3) SIMULATION CONSTANTS

함수	기능
TIME	Solver의 Simulation Time
PI	원주율 3.1415926....
DTOR	Degree를 Radian으로 변환하는 상수
RTOD	Radian을 Degree로 변환하는 상수

(4) Displacement

함수	기능
AX	두 Marker의 x축이 이루는 각도
AY	두 Marker의 y축이 이루는 각도
AZ	두 Marker의 z축이 이루는 각도
DM	두 Marker의 절대거리
DX	두 Marker의 x축 방향 거리
DY	두 Marker의 y축 방향 거리
DZ	두 Marker의 z축 방향 거리
PHI	두 Marker의 Euler Orientation 1번각도
THETA	두 Marker의 Euler Orientation 2번각도
PSI	두 Marker의 Euler Orientation 3번각도
ROLL	두 Marker의 Orientation x축 각도
PITCH	두 Marker의 Orientation y축 각도
YAW	두 Marker의 Orientation z축 각도

(5) Velocity

함수	기능
VM	두 Marker사이의 절대 속도
VR	두 Marker사이의 절대 속도에 접근 및 이탈의 방향을 부호로 출력
VX	두 Marker사이의 x축방향 속도
VY	두 Marker사이의 y축방향 속도
VZ	두 Marker사이의 z축방향 속도
WM	두 Marker사이의 절대 각속도
WX	두 Marker사이의 x축방향 각속도
WY	두 Marker사이의 y축방향 각속도
WZ	두 Marker사이의 z축방향 각속도

(6) Acceleration

함수	기능
ACCM	두 Marker사이의 절대 가속도
ACCX	두 Marker사이의 x축 방향 가속도
ACCY	두 Marker사이의 y축 방향 가속도
ACCZ	두 Marker사이의 z축 방향 가속도
WDTM	두 Marker사이의 절대 각가속도
WDTX	두 Marker사이의 x축 방향 각가속도
WDTY	두 Marker사이의 y축 방향 각가속도
WDTZ	두 Marker사이의 z축 방향 각가속도

(7) Generic Force

함수	기능
FM	두 Marker사이의 작용력의 절대값
FX	두 Marker사이의 x방향 작용력
FY	두 Marker사이의 y방향 작용력
FZ	두 Marker사이의 z방향 작용력
TM	두 Marker사이의 토크의 절대값
TX	두 Marker사이의 x방향 작용토크
TY	두 Marker사이의 y방향 작용토크
TZ	두 Marker사이의 z방향 작용토크

(8) Specific Force

함수	기능
CONTACT	Contact요소의 작동하중
MOTION	Motion요소의 작동하중
JFRICITION	Joint Friction의 작동하중
COUPLER	Coupler요소의 조인트반력
GEAR	Gear요소의 조인트반력
SHT3D_CF	MTT3D의 Sheet의 접촉하중
JOINT	Joint요소의 반력
PTCV	PTCV joint의 반력
CVCV	CVCV Joint의 반력
AXIAL	Axial Force의 작동하중
TFORCE	Translational Force의 작동하중
RFORCE	Rotational Force의 작동하중
SCREWFORCE	Screw force의 작동하중
BEAM	Beam 요소의 작동하중
BUSH	Bushing요소의 작동하중
SPRING	Spring요소의 작동하중
MATRIXFORCE	Matrix force요소의 작동하중

(9) System Element

DIF

Differential Equation Entity의 값에서 적분 값을 계산하는 기능

Ex) DIF(DE1) 은 I값을 출력

DIF1

Differential Equation Entity의 값에서 미분 값을 계산하는 기능

Ex) DIF1(DE1) 은 $\frac{dI}{dt}$ 값을 출력

VARVAL

Variable Equation으로 정의된 값을 Expression에서 사용

Ex) VARVAL(VE1) 은 VE1값을 출력

Sample: 모터의 전류와 기전력의 관계식

$$\dot{I} = \frac{V - RI}{L} \quad \left(V = RI + L \frac{dI}{dt} \right)$$

$$\text{Motor Torque} = K \cdot I$$

DE1: $(V - R \cdot I) / L$

VE1: DIF(DE1)

(10) Arithmetic IF

IF(f1:f2,f3,f4)

입력변수 f1이 조건에 따라 f2, f3, f4의

값으로 출력하는 조건반환 함수

변수 f1이 0보다 작으면 f2 반환

변수 f1이 0과 같으면 f3반환

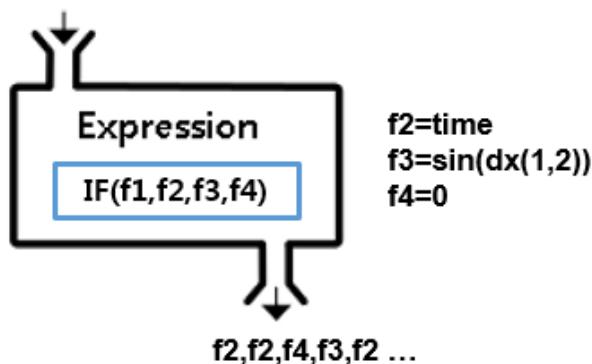
변수 f1이 0보다 크면 f4반환

$$\text{IF}(f1: f2, f3, f4) = \begin{cases} f2, & \text{when } f1 \leq -\text{IFT} \\ f3, & \text{when } -\text{IFT} \leq f1 < \text{IFT} \\ f4, & \text{when } \text{IFT} \leq f1 \end{cases}$$

※IFT(If tolerance): 수치적으로 0의 값을 가지기 어려우므로 0으로 가정하는 값

Example

f1 = -5,-3,2,0,-3 ...



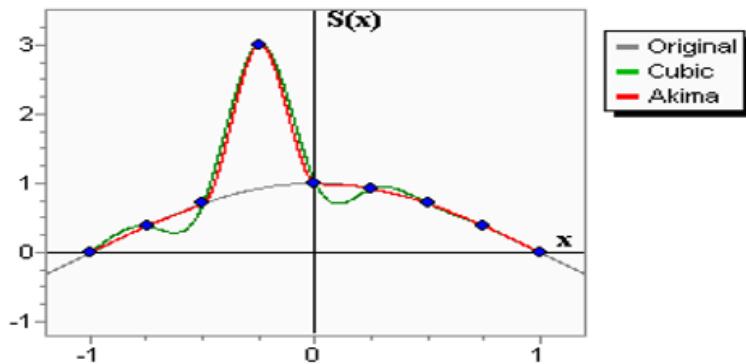
(11) Interpolation

CUBSPL

Cubic spline 보간법을 사용하는 함수, Motion을 Spline함수로 사용할 때 주로 이용

LINSPL

선형 보간법을 사용하는 함수, 제어기의 조작입력이나 하중 입력 시 주로 이용



Akima와 Cubic spline의 가장 큰 차이는 미분차수에 따른 값의 연속성이다. Akima는 1차 미분까지 연속적이며, Cubic은 2차 미분까지 연속적이다 (Force모델링에는 Akima사용, Motion 입력에는 Cubic사용)

(12) General

함수	기능
BISTOP	양방향 해석적 접촉 함수
CHEBY	체비쇼프 다항식 함수 계산
FORCOS	퓨리에 cosine급수를 계산
FORSIN	퓨리에 sine급수를 계산
HAVSIN	Sine함수를 조합한 계단함수계산
IMPACT	단방향 해석적 접촉 함수
POLY	다항식 함수 계산
SHF	Sine함수를 입력파라미터에 따라 계산
STEP	4차 다항식을 이용한 계단함수계산
STEP5	5차 다항식을 이용한 계단함수계산
SWEET	Sine함수의 주기변환 함수 계산

2. Request

Request는 Expression 또는 Model요소에 대한 해석결과를 특정하여 출력할 때 사용하는 Entity이다. 해석결과를 추출할 때 사용하는 Request는 모두 4가지가 있으며 각 경우에 대해 필요한 요소를 사용하면 된다. Request 메뉴는 Subentity Tab의 Request Button을 누르면 생성할 수 있다.

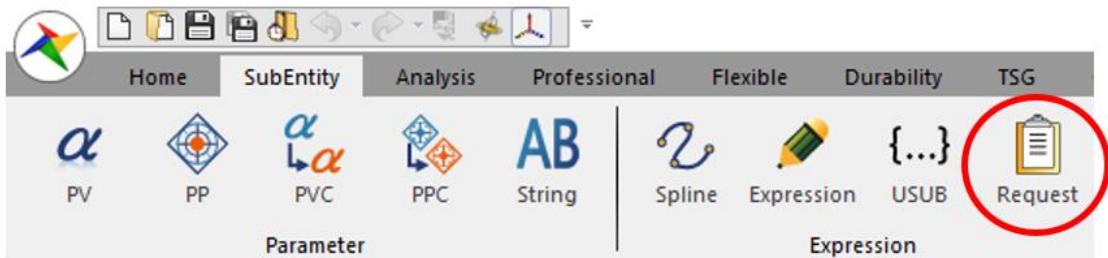


Figure 154 Request 메뉴

1) Standard

Standard Request는 Body, Joint, Force와 같은 다물체동역학의 일반요소들이 가지는 해석결과를 추출하기 위해 사용된다. Body는 물체의 속도와 위치 및 가속도에 대한 결과를 추출하고 Joint는 변위와 조인트 반력을 추출할 수 있다. 또한 Force의 경우 각 방향으로 작용하는 힘의 크기를 측정할 수 있다.

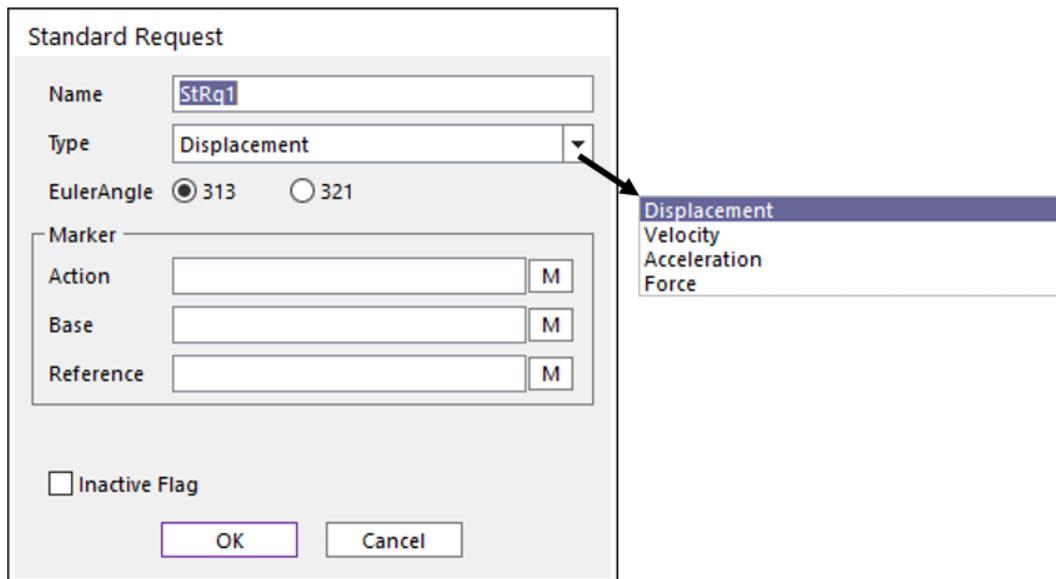


Figure 155 Standard Request

2) Expression

Expression Request는 생성되어 있는 Expression의 값을 그래프 데이터로 출력하기 위해 사용된다. Expression의 값은 Force 또는 Joint의 입력 값으로 사용되더라도 Expression값의 결과가 R1pt파일에 출력되지는 않는다. 이럴 경우 Expression을 Request로 등록하면 데이터를 직접 관찰할 수 있다.

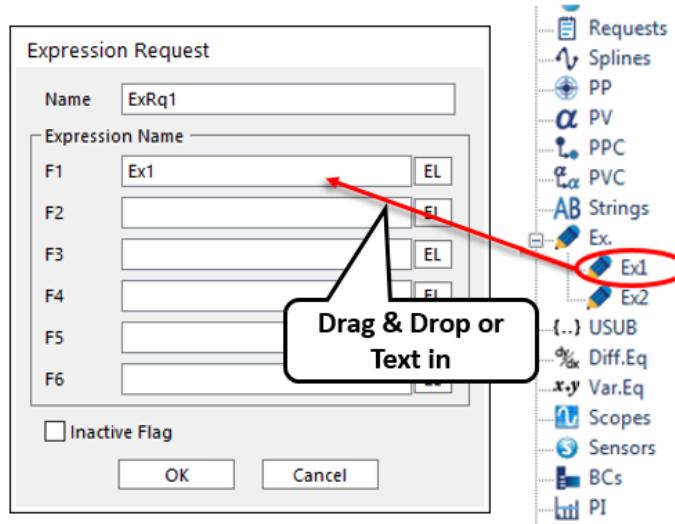


Figure 156 Expression Request

3) User

User request는 User subroutine을 이용한 Request값을 관찰할 때 사용된다. 이 경우 반드시 User Subroutine이 등록되어 있어야 한다.

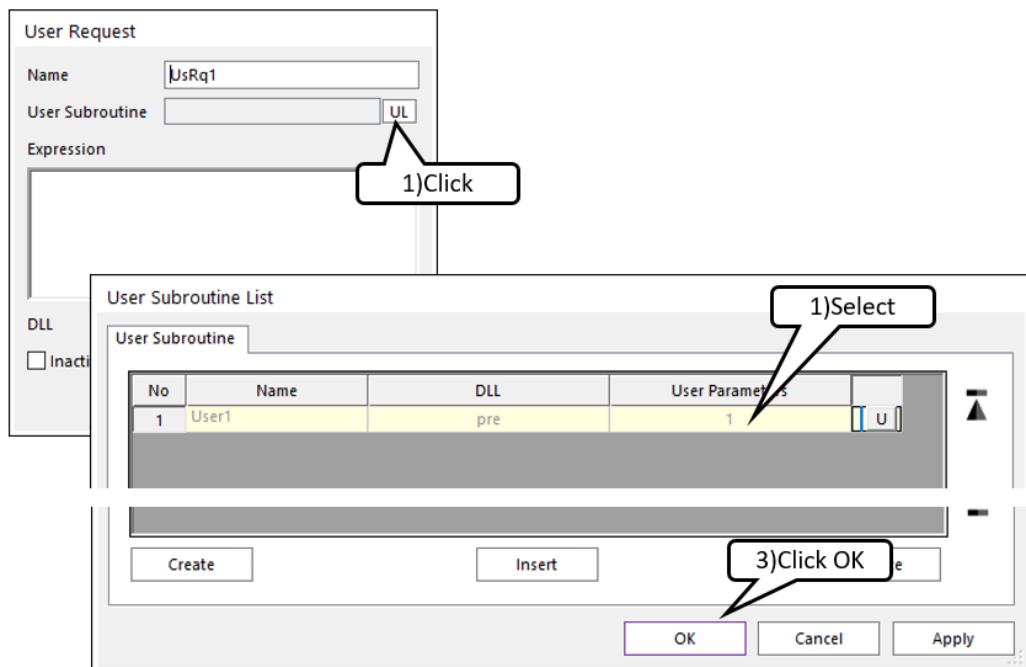


Figure 157 User Request

4) RFlex

RFlex Request는 RFlex Body의 노드에 대한 다양한 해석결과를 관찰하기 위해 사용된다. RFlex Body의 경우 각 노드의 해석결과가 매Step저장되지만 RFlex의 경우 Default로 저장되지 않고 사용자가 출력하고자 하는 node를 지정하여 해석결과를 저장한다. 이는 Mesh 또는 Node의 개수가 상대적으로 RFlex Body가 많기 때문에 해석결과의 간소화를 위해 만들어진 기능이다.

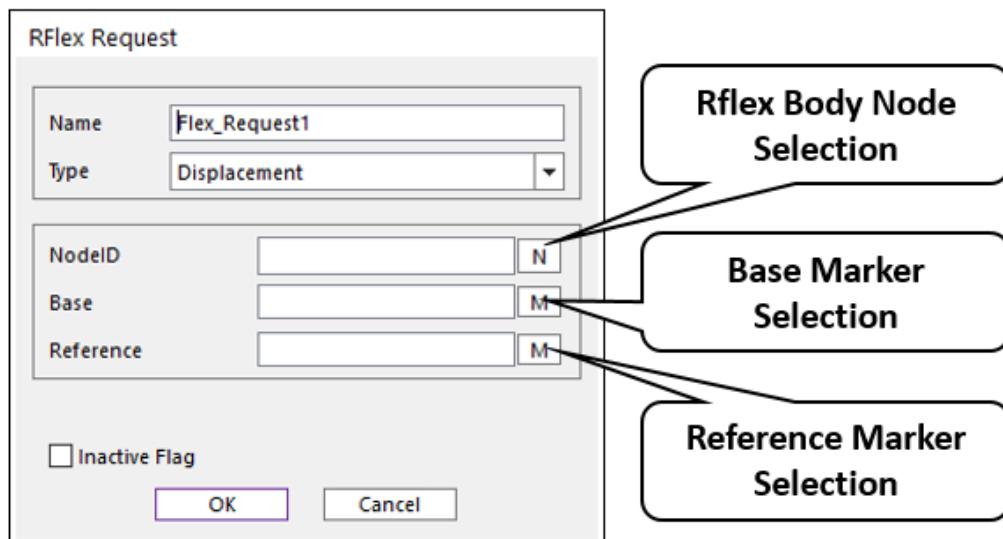


Figure 158 RFlex Request

Chapter 11. Model Settings

Lecture:

RecurDyn Model의 설정과 관련된 내용의 습득

Workshop

None



소요 시간

강의명	시간(분)
RecurDyn 모델 설정관련 설명	30 분
총합	60 분

1. Model Settings

RecurDyn의 모델에 대한 설정은 모델 파일인 RDYN에 저장되는 내용이며, 모델을 저장하면 설정도 함께 저장된다. 모델 설정에 대한 내용은 다음과 같으며, 각 기능을 잘 익히면 보다 편리한 작업환경과 사용자 요구에 맞춘 모델을 구성할 수 있다. 모델의 설정과 관련된 메뉴는 Home Tab에 있으며 아래와 같다.

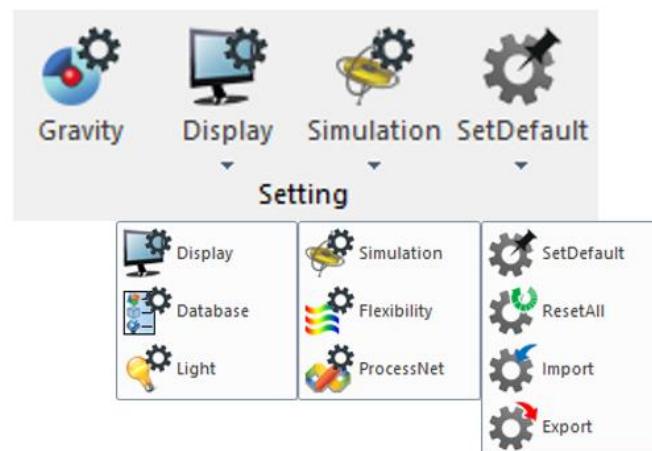


Figure 159 Model Setting Menu

1) Gravity

중력에 대한 설정으로서 Global Coordinate에 대해 원하는 방향으로 조정할 수 있다. 또한 중력의 수치 또한 직접 입력하여 원하는 값을 입력할 수 있다. 만약 무중력을 구현하고 싶다면 0의 값을 입력하면 되며, 달 표면에서의 거동을 구현하기 위해서는 지구중력의 1/4에 해당하는 값을 입력하면 된다. 왼쪽 상단에 있는 Option창은 Global Coordinate의 각 축의 방향을 의미하며 Custom으로 설정할 경우 중력의 작용방향을 Direction Vector 형태로 정의할 수 있다. 이 기능은 주로 기울어진 상황을 해석하기 위해 Model을 회전시키지 않고 중력의 방향만 바꾸어 해석할 때 사용한다.

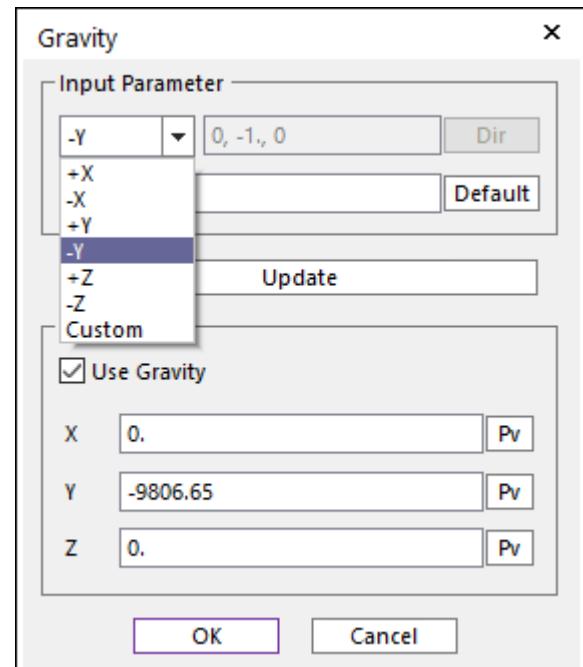


Figure 160 Gravity Setting

2) Display

Display 설정은 가장 많은 기능적 옵션을 담고 있음으로 잘 이해할 필요가 있다.

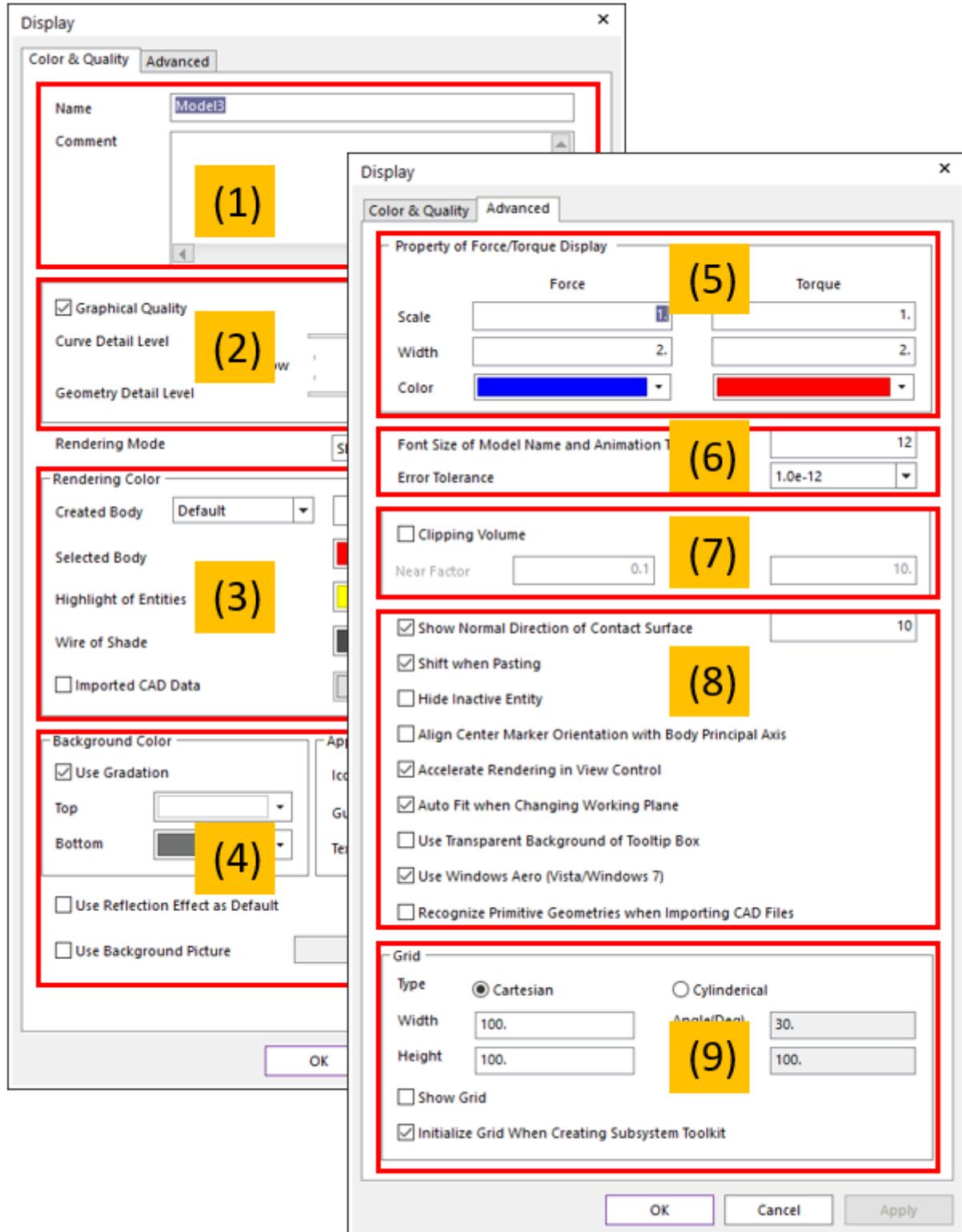


Figure 161 Display Setting

(1) Name & Comment

Database에 나타나는 모델의 이름을 정하고 모델에 대한 부연 설명을 입력, 모델의 이름과 Rdyn 파일의 이름은 서로 독립적이다.

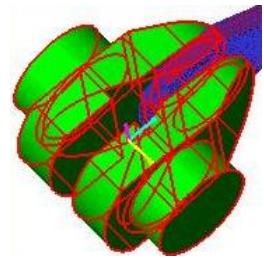
(2) Graphic Quality

RecurDyn의 Working Window에 나타나는 Geometry의 형태를 모니터에 그려줄 때 얼마나 섬세하게 표현하는가를 결정하는 옵션으로서 Detail Level이 높을수록 원과 곡선에 대한 표현이 더 부드러워진다. 그러나 Detail Level이 높으면 Graphic처리시간이 크게 증가하므로 복잡한 형태의 CAD를 다룬다면 이 값을 낮게 하고 사용하는 것이 바람직하다.

(3) Rendering Color

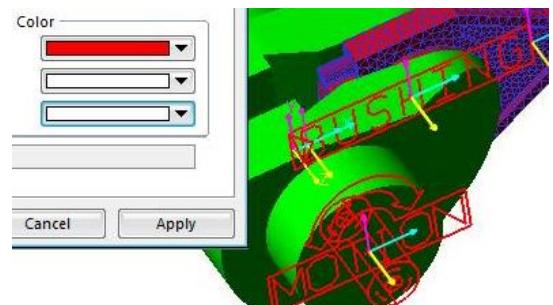
다양한 Operation 수행 시 Rendering Color에 대한 설정을 바꿀 수 있다.

- Select Body : Working Window에서 Body를 선택했을 경우 선택된 상태에 대해 표현되는 색을 선택한다. Default값은 적색이다
- Highlight of Entities: 특정 Body 또는 Entity를 선택하고자 마우스를 각 Entity위로 움직일 경우 커서의 위치에 존재하는 Entity의 색이 변화한다. 이는 현재 Mouse가 가리키고 있는 Entity를 잘 인지하도록 하는 기능이며 이 때의 색을 선택한다. Default 값은 노란색이다.
- Wire of Shade: Rendering 모드를 Shade with wire로 할 경우 outline을 wire로 표현하는데 이 때 나타내는 색을 의미한다. Default값은 진회색이다.
- Imported CAD Data: 외부의 CAD data를 Import하면 CAD data 자체의 색으로 입력된다. 이 옵션을 사용하면 CAD data를 Import할 때 강제로 특정 색으로 변경시킬 수 있다.



(4) Background Color

- Use Gradation: Working Window의 배경화면의 색상을 단일 색 또는 Gradation 형태로 설정할 수 있다.
- Appearance Color: Working Window의 Icon, Guide 또는 Text의 색을 변경할 수 있다.
- Use Reflect Effect as Default: Geometry의 표면에 거울처럼 반사되는 형태의 표현을 Default로 적용할 것인지의 설정이다.
- Use Background Picture: Working Window의 배경을 특정 그림으로 변경할 때 사



용하는 설정이다.

(5) Property of Force/Torque Display

해석 후 Joint나 Force Entity의 힘이나 토크의 크기를 Animation상의 화살표 형태로 표현하여 결과를 관찰할 수 있다. 이 때 화살표의 길이, 색상 또는 두께를 변경할 수 있다.

(6) Font Size and Tolerance

- Font size: Working Window의 좌측 상단에 있는 Model Name과 Time의 Text 크기 설정



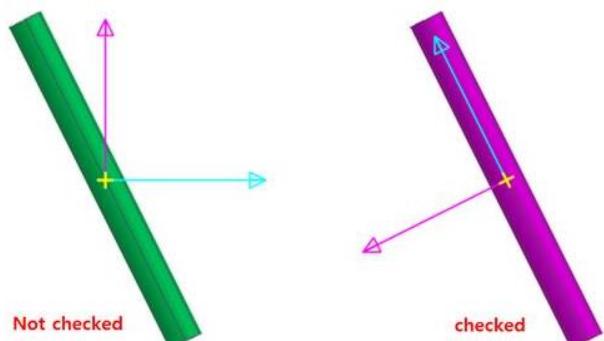
- Tolerance: Input Data에서 0으로 인식하는 최소값을 설정

(7) Clipping Volume

원근뷰(Perspective) 설정 상태에서 시점에 대해 물체의 시각화Volume을 설정할 수 있다. 원근뷰에서 Zoom In을 수행 시 화면에서 보이지 않는 영역이 발생하면 주어진 파라미터 Near Factor와 Far Factor를 설정하여 시각화 가능한 영역을 넓힐 수 있다

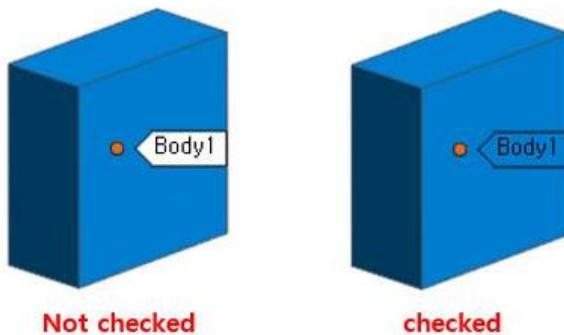
(8) ETC

- Show Normal Direction of Contact Surface: Contact을 생성 후 Contact Property창을 열면, 지정된 Contact surface가 Highlight되면서 Surface의 Normal Vector를 Graphic적으로 확인 할 수 있다. 이 옵션은 Normal Vector를 끄거나 화살표 Icon의 개수를 결정
- Shift When pasting: Body, Geometry 또는 Marker와 같이 좌표를 가지는 Entity는 복사(Ctrl+C) 후 붙여넣기(Ctrl+V) 할 때 100mm 만큼의 x와 y방향의 Offset을 입력한다. 만약 이 Offset값이 입력되지 않기를 바란다면 옵션의 Check를 꺼면 됨
- Hide Inactive Entity: Model에서 Inactive되는 Entity를 Working Window에서 Hide 해준다.
- Align center marker orientation with body principal axis: Recurdyn에서 Body의 CM Marker Orientation은 0,0,0으로서 Global XYZ와 나란하다. 만약 CM Marker의 Orientation을 Inertia 주축과 나란히 두고 싶으면 이 옵션을 Check하면 됨
※ ADAMS의 경우 기본적으로 이 옵션이 켜진 상태로 모델링되며



ADAMS Model과 상호 비교하기 위해서는 이 옵션을 켜야 한다.

- Accelerate rendering in view control: Working Window의 화면을 Translate하거나 Rotation하는 Operation을 수행할 때 Wireframe 형태로 보이도록 순간적으로 변경이 되어 처리 속도를 높이는 옵션이다. 만약 Graphic Card가 충분히 높은 성능을 낼 수 있다면 이 옵션은 끄는 것이 바람직하다.
- Auto fit when changing working plane: working plane의 설정을 바꾸면 자동으로 화면을 Fit하는 기능이 수행되도록 하는 옵션이다.
- Use transparent background of tooltip box: Working Window의 Entity에 대한 이름을 표시하는 기능(PP, BODY)에서 이름의 배경색을 투명하게 하는 옵션



- Use Windows Aero : Windows의 창을 다양한 시각효과를 부여하여 표현하는 기능을 RecurDyn UI에 적용하는 기능

(9) Grid

Working Window의 grid에 대한 설정을 변경할 수 있다.

3) Light

Light는 Working Window에 나타나는 Geometry의 3차원 형상으로 비추는 조명을 설정하는 것이다. 이 조명의 설정에 따라 3차원 입체감이 둘보이거나 감소하게 할 수 있다. Direction은 빛이 진행하는 방향을 뜻하며, Intensity는 조명의 집중도로서 넓게 퍼지는 조명을 사용하고 싶다면 Intensity를 낮게 하면 된다.

Light Setting						
No	Use	Name	Direction	Intensity	Lock	
1	<input checked="" type="checkbox"/>	KeyLight	0.58, -0.58, -0.58	Dir 0.90	<input type="checkbox"/>	
2	<input checked="" type="checkbox"/>	FillLight	-0.58, 0.58, 0.58	Dir 0.60	<input type="checkbox"/>	
3	<input type="checkbox"/>	BackLight	0, 0, 1.	Dir 0.40	<input type="checkbox"/>	
4	<input type="checkbox"/>	Light4	1.0, 0.0, 0.0	Dir 0.5	<input type="checkbox"/>	

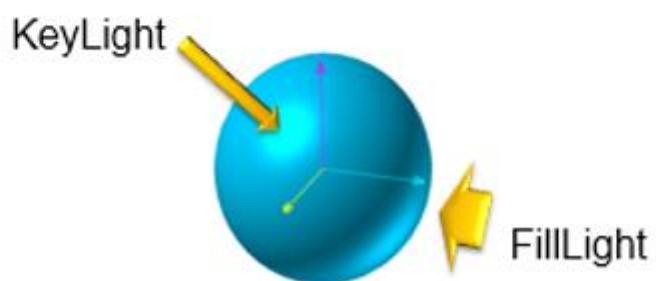
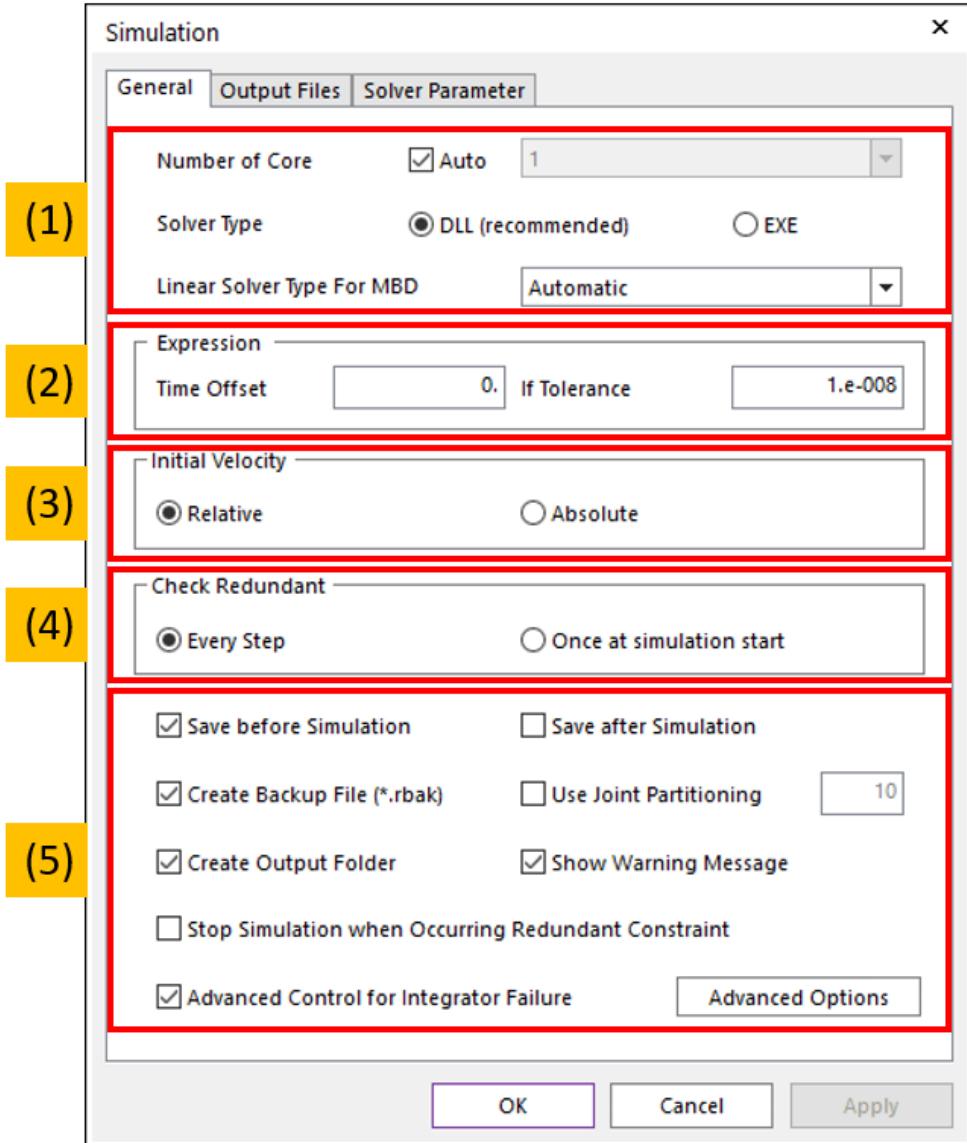


Figure 162 Light Setting

4) Simulation

시뮬레이션 설정은 Solver가 해석을 수행할 때 필요한 여러 가지 옵션을 지정하는 것으로서 다양한 해석에 필요한 중요한 설정이 포함된다. 해석의 종류에 따른 필요한 설정을 정확히 이해하고 이 설정을 조정하는 것이 필요하다.



(1) Core 개수 및 Solver Type

- Number of Core : Solver가 사용할 Core의 개수를 지정할 수 있다. SMP(sheared memory processing) 기능은 2의 지수의 개수만큼의 CPU를 사용할 때 효과를 발휘 할 수 있다. 즉, 2,4,8,16,32... 와 같이 설정하여 해석속도의 향상을 기대할 수 있다. Auto로 설정할 경우 PC가 보유한 CPU의 최대 개수만큼 자동으로 사용하게 된다.
- Solver Type : Exe Solver와 DLL Solver의 사용을 결정할 수 있다. DLL Solver의 경우 GUI프로그램과 연동하여 Solver가 작동하며, EXE Solver의 경우 GUI에서 Solver Process를 호출하여 별도의 Exe Solver가 동작한다. 따라서 Solver의 비정상 종료 상황에 대해 GUI프로그램을 보호할 수 있다. 다만, Simulink Co-simulation과 같이 Main Memory Shared Process와 같은 경우 Exe Solver를 이용할 경우 여러 개의 Solving Process를 진행할 수 없다.

(2) Expression

- Time Offset: Expression에 입력되는 Time의 값에 Offset Value를 입력한다. 주로 Extract 기능을 이용하여 모델을 새롭게 생성하여 해석을 수행할 때 사용한다.
- If Tolerance: Expression에서 사용하는 If 문의 조건식이 0이 될 경우에 대한 구간을 의미한다. 수치해석에서 값이 만들어지는 것은 거의 불가능하다. 따라서 0에 근접하면 0으로 인식하도록 할 필요가 있다.

(3) Initial Velocity

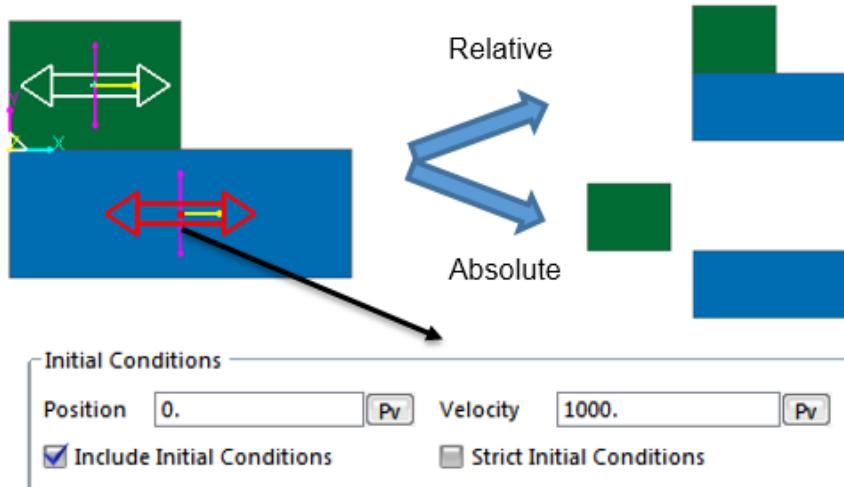
- Relative: 조인트로 연결된 body의 초기 속도를 결정할 때, Base Body가 연결된 조인트의 초기 속도를 따르도록 계산
- Absolute: 조인트로 연결된 body의 초기 속도를 결정할 때, Base Body가 연결된 조인트의 초기 속도를 따르지 않도록 계산

Ex) Ground와 Body1, Body1과 Body2가 각각 Translation Joint로 연결되어 있다.

이 때 Ground와 연결된 Joint의 Initial 속도를 1m/s로 입력하면,

Relative의 경우 Body2의 속도가 1m/s가 되며, Absolute인 경우 Body 2의 속도가 0m/s가 된다.

이러한 설정은 Joint Initial Velocity를 입력하였을 경우만 유효하며 Body의 초기속도가 함께 입력된 경우 이를 따른다.



(4) Check Redundant

- MBD 모델링에서 과구속이 발생하는 경우 불필요한 구속식이 자동으로 제거된다. 그러나 이러한 구속식을 찾는 과정에서 해석의 수렴성에 영향을 주게 된다. Every Step의 옵션일 경우 매 Step마다 과구속을 Check하여 수렴성을 향상시킨다. Once at simulation start의 경우 최초 해석 시 1회만 Check하여 제거된 구속식이 해석종료까지 유지되는 방식이다. 수렴성을 위해서는 At Every Step이 좋다. 그러나 가급적 과구속이 나타나지 않는 모델링을 수행하는 것이 가장 바람직하다.

(5) 기타 설정

- Save Before simulation, after simulation: 해석을 수행하기 전 또는 후에 모델을 자동 저장하는 기능이다. 모델의 안정적 보유를 위해 켜두는 것이 바람직하다.
- Create Backup File: 자동저장기능을 사용할 때 이전 모델을 자동으로 Backup해 주는 기능이며 이 Backup모델은 사용자가 저장 버튼을 누른 최종상태의 모델이다.
- Create Output Folder: 해석 수행 시 자동으로 Output Folder를 생성시킨다.
- Show Warning Message:
- Stop Simulate When occurring Redundant Constraint: 과구속 모델일 경우 모델을 자동으로 정지시킨다.
- Use Sparse Solver for MBD: MBD 모델의 해석 시 Sparse Linear Solver기능을 사용한다.
- Use Joint Partitioning: 대량의 Body가 Chain형태로 연결되어 있을 경우 매우 긴 Relative Coordinate 수식이 만들어지며, 이는 해석속도에 불리하게 작용한다. 이 기능은 많은 수의 Body가 직렬형태로 조인트로 연결되어 있는 경우 입력된 개수만큼의 상대좌표 수식을 분할하여 계산하여 해석속도를 향상시킨다. 즉, 많은 수의 조인트가 직렬로 길게 연결되어 있는 경우에만 사용

(6) Start & End Times for Output

- 해석이 진행될 때 특정 시간 구간에 대해서만 결과를 출력하고자 할 때 사용한다. 예를 들어 최초 해석 시작부터 모델이 안정화되는 구간에 대한 결과를 배제하고자 하면 Start Time을 입력하여 과도구간에 발생하는 큰 힘이나 변위의 데이터를 결과파일에 기록하지 않도록 할 수 있다.

(7) Result Files

- 해석 결과로 어떤 파일을 생성할 것인지를 설정한다. 해석 결과 파일에 대해서는 차후에 다시 논하기로 한다.

(8) Message File Setting

- 해석과정에서 생성되는 Message File(.msg) 파일에 기록할 내용을 설정하는 것으로서 해석과정에 대한 다양한 정보를 출력유무를 결정할 수 있다.