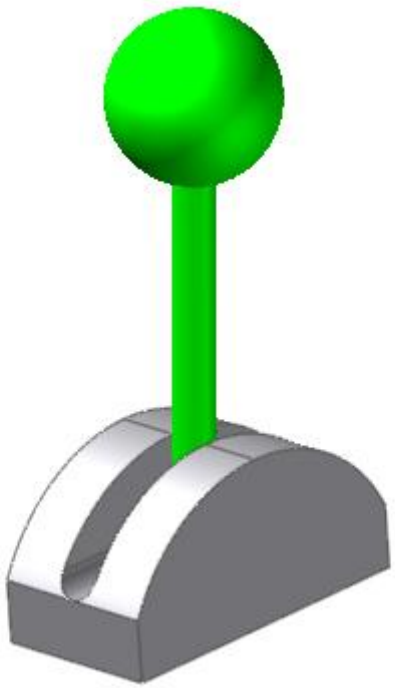
RECURDYN

Pendulum Tutorial (CoLink)



FunctionBay

Copyright © 2020 FunctionBay, Inc. All rights reserved.

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

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

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

Registered Trademarks of FunctionBay, Inc. or Subsidiary

RecurDyn is a registered trademark of FunctionBay, Inc.

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

are trademarks of FunctionBay, Inc.

Edition Note

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

목차

Getting Started 4
- Objective 4
- Audience 4
- Prerequisites 4
- Procedures 5
- Estimated Time to Complete 5

Creating the Initial Model 6
- Task Objective 6
- Estimated Time to Complete 6
- Understanding the Model 7
- Starting RecurDyn and Importing the Geometry 8
- Adding Joints and Forces 10
- Running a Simulation 13
- Viewing the Results 14

Integrating CoLink 16
- Task Objective 16
- Estimated Time to Complete 16
- Creating the Plant Input 17
- Creating the Plant Outputs 19
- Creating the CoLink Model 20
- Simulating the CoLink Model 24

Adding Derivative Control 26
- Task Objective 26
- Estimated Time to Complete 26
- Modifying the RecurDyn Model 27
- Adding Derivative Control 28
- Simulating the Model with Derivative Control 30

Adding Integral Control 32
- Task Objective 32
- Estimated Time to Complete 32
- Adding Integral Control 33
- Simulating the Model with PID Control 35

Chapter 1

Getting Started

Objective

이 튜토리얼에서는 설계, 시뮬레이션, 시간 변이 시스템의 테스트를 위한 상호 환경인 CoLink 를 사용하여 동역학 시스템의 시뮬레이션 수행 및 제어에 대해 다루게 될 것입니다. 또한, RecurDyn 에서 설계한 기계 시스템을 제어 하기 위해서 제어 시스템을 정의하게 될 것입니다.

이 시스템에서는 좌우로 이동이 가능한 물체에 거꾸로 된 Pendulum 을 탑재하여 시뮬레이션 합니다. Pendulum 은 옆에서 힘이 작용하여 직립 위치로 균형을 유지 하도록 되어 있습니다. 튜토리얼에서 힘을 제어하는 각종 제어 시스템을 구현합니다.

Audience

이 튜토리얼은 이전에 조인트, 힘, 2D 컨택, 지오메트리 생성을 RecurDyn 을 통해 사용해본 사용자를 위한 것입니다. 모든 작업은 자세하게 설명되어 있습니다.

Prerequisites

3D Crank-Slider, Engine with Propeller, Pinball (2D Contact) 튜토리얼 또는 그와 동등한 수준의 것을 연습해 본 사용자이어야 하며, 기초적인 물리 지식이 요구됩니다.

Procedures

튜토리얼은 다음 절차로 구성되어 있습니다. 각 절차를 완료하는 데 걸리는 예상 시간은 테이블에 표시됩니다.

Procedures	Time (minutes)
Creating the initial model	10
Integrating CoLink	15
Adding Derivative Control	10
Adding Integral Control	5
Total:	**40**

Estimated Time to Complete

40 분

Chapter

2

Creating the Initial Model

Task Objective

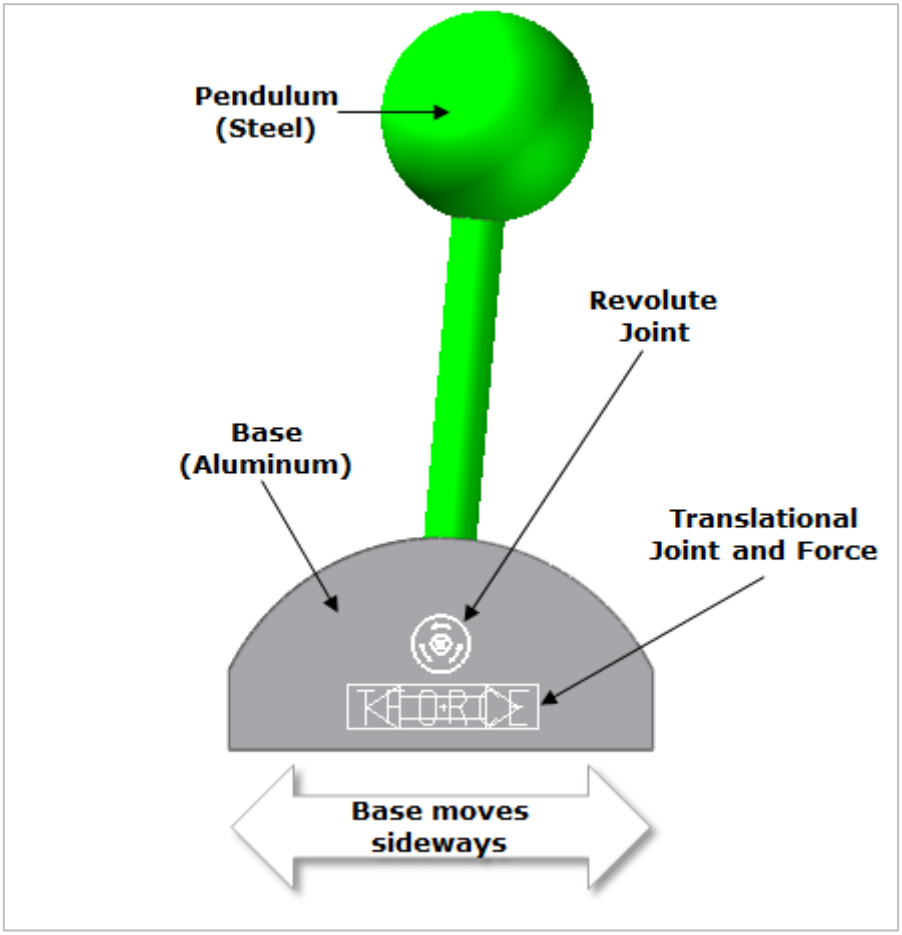
제어 시스템과 함께 사용할 기계 모델을 작성하는 방법에 대해 알아보십시오.

Estimated Time to Complete

10 분

Understanding the Model

시작하기 전에, 아래의 그림은 완성된 모델의 모습을 보여줍니다.



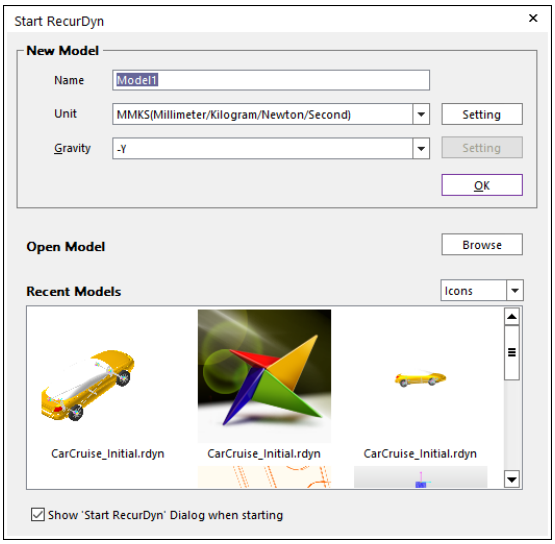
모델에 대한 주의 사항입니다.

- **Pendulum** 을 움직이도록 하기 위해 수직에서 5 도만큼 오프셋을 적용합니다.
- 기본 바디는 알루미늄으로 만들어졌고 **Pendulum** 은 강철로 만들어졌습니다. 적절한 질량 밀도는 이미 Parasolid 파일에 정의되어 있습니다. 물체를 가져온 후에 당신은 바디 속성 창의 Body 탭 아래에 다른 밀도를 볼 수 있을 것입니다.
- 모델을 5 초 동안 시뮬레이션 합니다.

Starting RecurDyn and Importing the Geometry

To start RecurDyn:

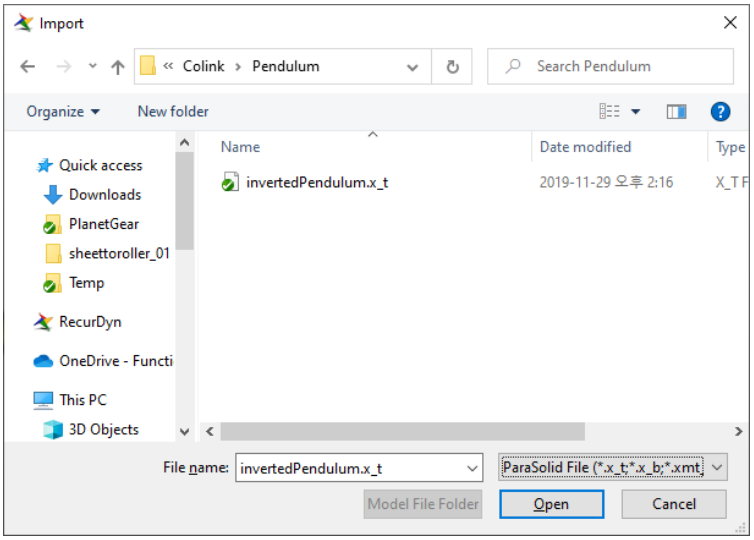
1. 바탕화면에서 **RecurDyn** 아이콘을 더블 클릭합니다.
2. **Start RecurDyn** 대화상자에서 모델 이름을 **Pendulum** 으로 입력합니다.
3. **OK** 클릭합니다.



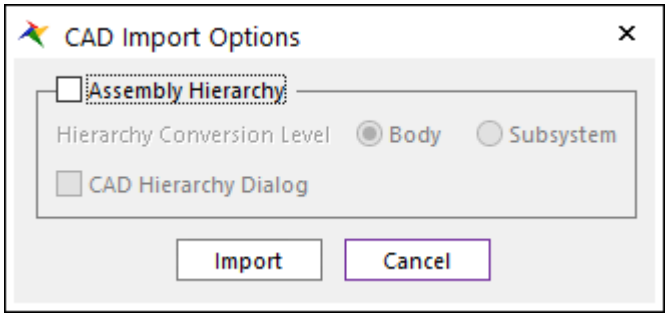
To import the geometry:

1. **File** 메뉴에서 **Import** 를 선택합니다.
2. **Import** 파일 타입을 **ParaSolid File** 로 바꿔줍니다.
3. **CoLink** 튜토리얼 디렉토리를 찾아갑니다.
4. **invertedPendulum.x_t** 파일을 선택합니다.

   (**The file location:** <Install Dir> \Help \Tutorial \Colink \Pendulum)

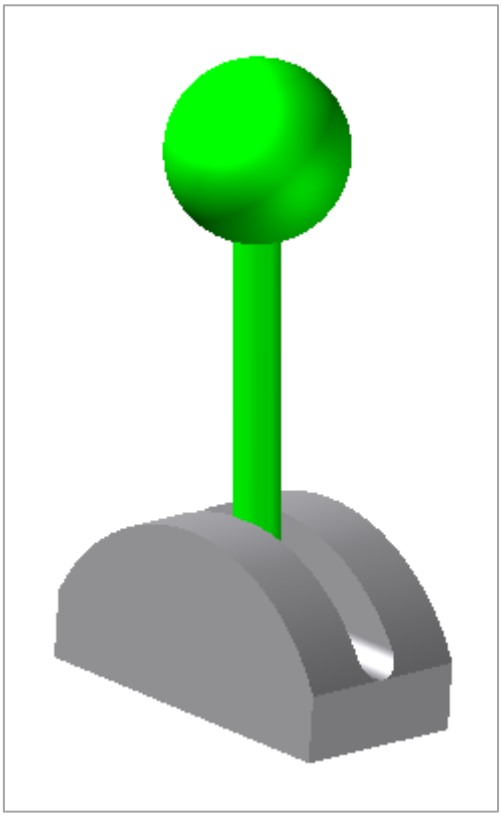


5. **Open** 클릭하면 **CAD Import Options** 창이 나타납니다. **Assembly Hierarchy** 선택을 해제한 후, **Import** 버튼을 누릅니다.



6. **Render Mode** 를 **Shade** 로 바꿔줍니다.

   Base 바디와 **Pendulum** 바디가 아래와 같이 보여집니다.



7. **Base** 바디를 선택하고 마우스 오른쪽으로 클릭하여 **Properties** 를 선택합니다.
8. **General** 탭에서 이름을 **Base** 으로 바꾸어 줍니다.
9. **OK** 클릭합니다.
10. **Pendulum** 바디의 이름을 **Pendulum** 으로 바꾸어줍니다.

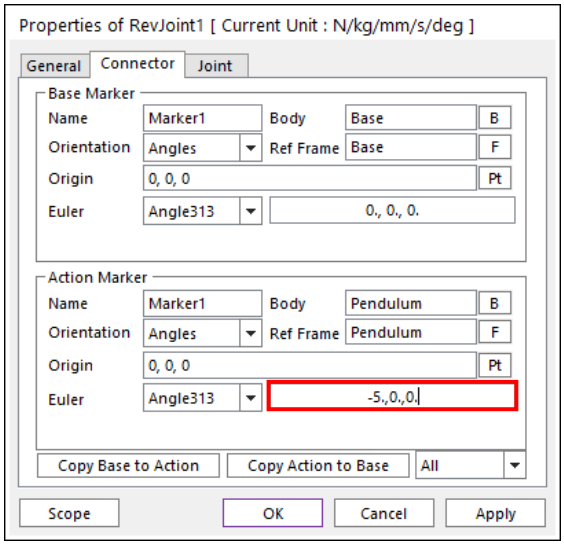
Adding Joints and Forces

두 개의 기계적 조인트와 병진 힘을 추가합니다.

To add the revolute joint:

1. **Professional** 탭의 **Joint** 그룹에서 **Revolute** 를 선택합니다.
2. 모델링 설정을 **Body, Body, Point** 로 선택합니다.
3. Base Body 로 **Base** 를 선택합니다.
4. Action Body 로 **Pendulum** 를 선택합니다..

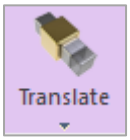
5. 조인트의 좌표로 **0, 0, 0** 을 입력합니다.
6. **Database window** 에 있는 **RevJoint1** 를 오른쪽 마우스로 클릭하고 **Properties** 를 선택합니다.
7. **Connector** 탭 아래에서 Action Marker's Euler angle 을 **-5, 0, 0** 로 바꿔줍니다.



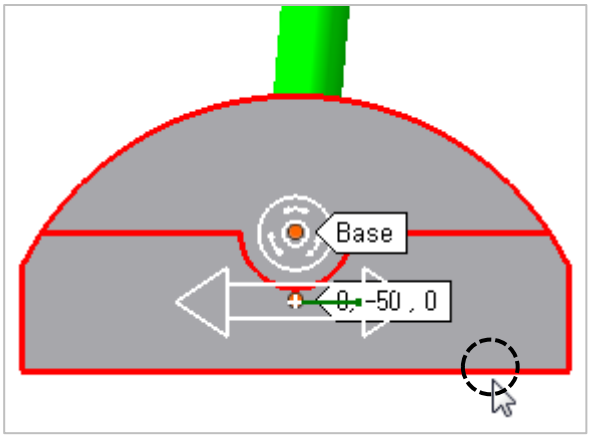
Note: 이 설정은 제어 시스템의 조인트에 -5 도만큼 초기 회전을 설정하기 위함입니다.

8. **OK** 클릭합니다.

To add the translational joint:



1. **Professional** 탭의 **Joint** 그룹에서 **Translate** 을 선택합니다.
2. 모델링 설정을 **Body, Body, Point, Direction** 로 선택합니다.
3. Base Body 로 **Ground** 를 선택합니다.
4. Action Body 로 **Base** 를 선택합니다.
5. **Base** 의 오른쪽 아래 부분의 가장자리 선 위에 마우스를 올려두면 조인트의 방향이 오른쪽에 그림처럼 표시 되야 합니다.
6. **Base** 바디의 가장자리를 클릭합니다.



To add the translational force:

1. **Professional** 탭의 **Force** 그룹에서 **Translational** 를 선택합니다.
2. 모델링 설정옵션을 **Body, Body, Point, Point** 로 선택합니다.
3. Base Body 로 **Ground** 를 선택합니다.
4. Action Body 로 **Base** 를 선택합니다.
5. Base Body 와 Action Body 포인트로 **0, -50, 0** 를 두 번 입력합니다.

Save the RecurDyn Model:

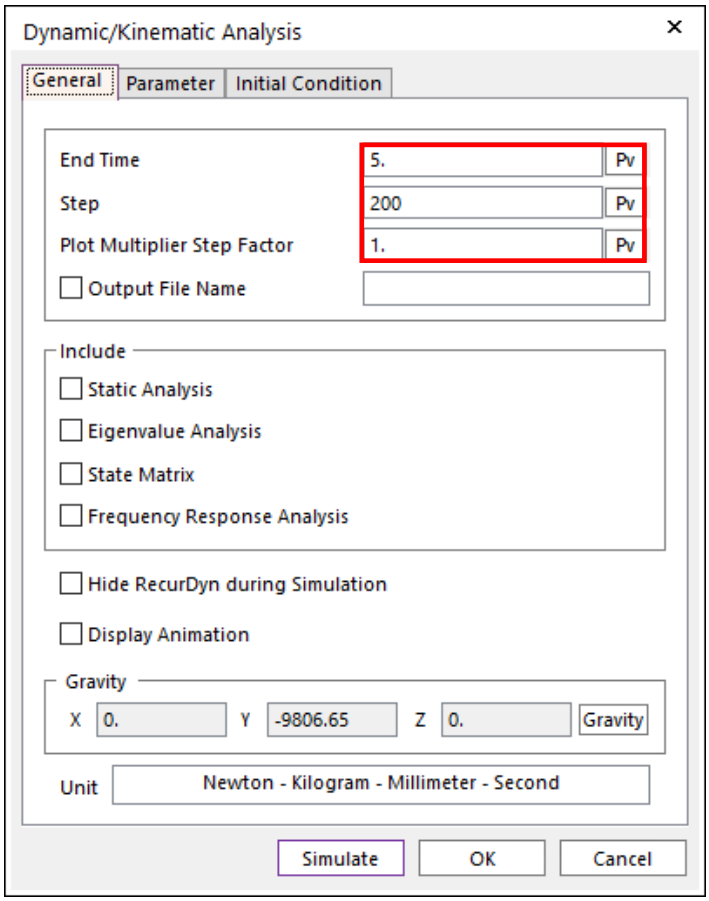
Pendulum_P.rdyn 으로 모델을 저장합니다.

Running a Simulation

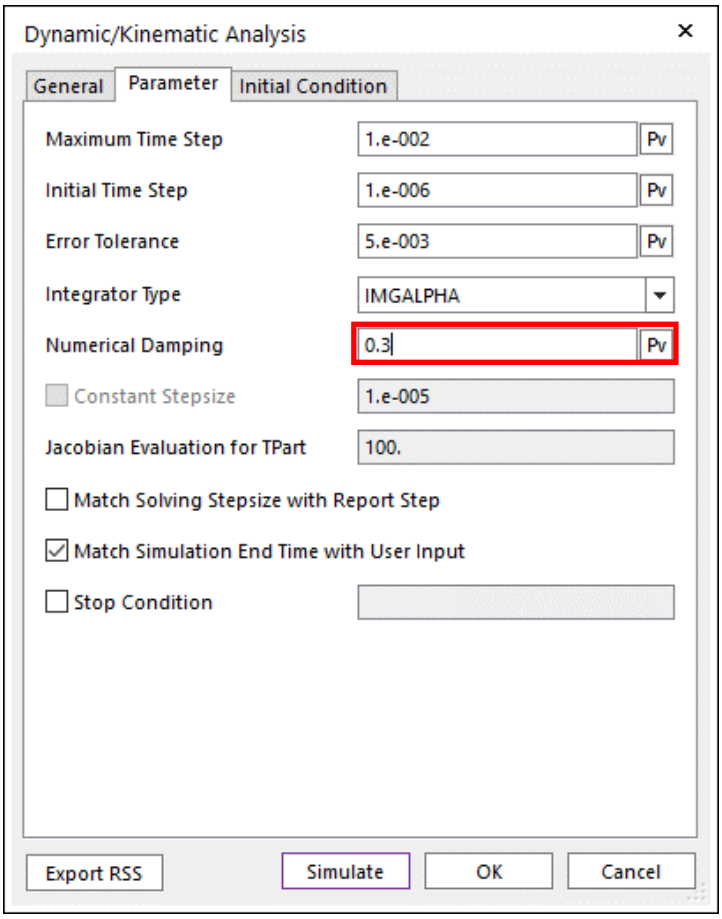
통제가 안된 Pendulum 시스템은 어떤 동작을 하는지 볼 수 있도록 시뮬레이션을 실행할 수 있습니다.

To run a simulation:

1. **Analysis** 탭의 **Simulation** 그룹에서 **Dyn/Kin** 을 선택합니다.
2. 오른쪽 그림과 같이 **5** 초 동안 **200** 스탭으로 시뮬레이션을 설정합니다. 이 설정은 **Pendulum** 의 움직임을 볼 수 있는 충분한 시간을 제공합니다.



3. **Parameter** 탭에서 **Numerical Damping** 을 **0.3** 으로 설정합니다.
4. **Simulate** 을 클릭합니다.

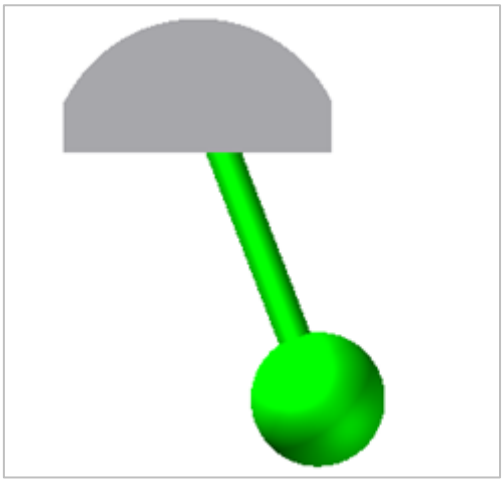


Viewing the Results

To view the results:

1. **Analysis** 탭의 **Animation Control** 그룹에서 **Play** 버튼을 클릭하여 결과를 실행합니다.

   Pendulum 이 자유롭게 아래쪽으로 스윙하고 기본 바디도 자유롭게 오른쪽 방향으로 움직이는



   것을 볼 수 있습니다.

Save the RecurDyn Model.

Chapter

3

Integrating CoLink

Task Objective

이 장에서는 **CoLink** 와 통합된 모델을 설정하고 **CoLink** 모델을 생성합니다. **CoLink** 모델은 단순비례(P) 제어 시스템입니다. 그런 다음 제어 시스템을 시뮬레이션하고 결과를 그래프에 나타냅니다.

Estimated Time to Complete

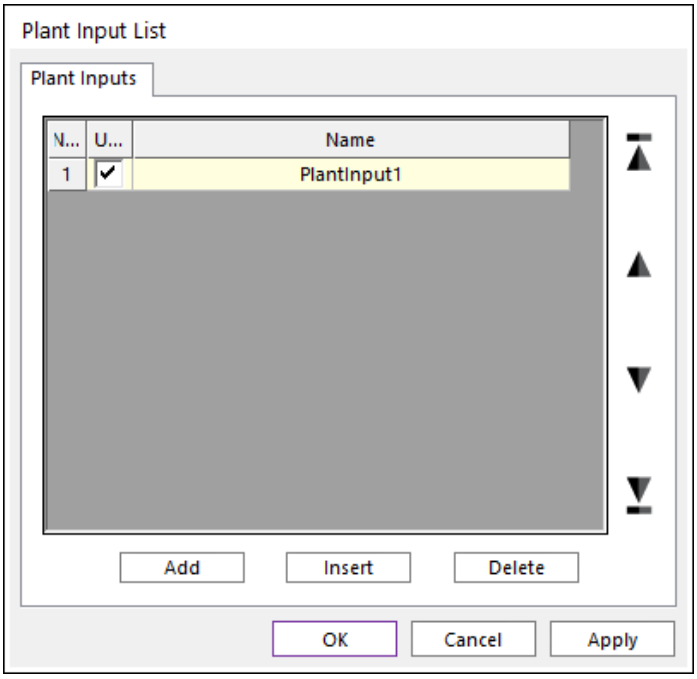
15 분

Creating the Plant Input

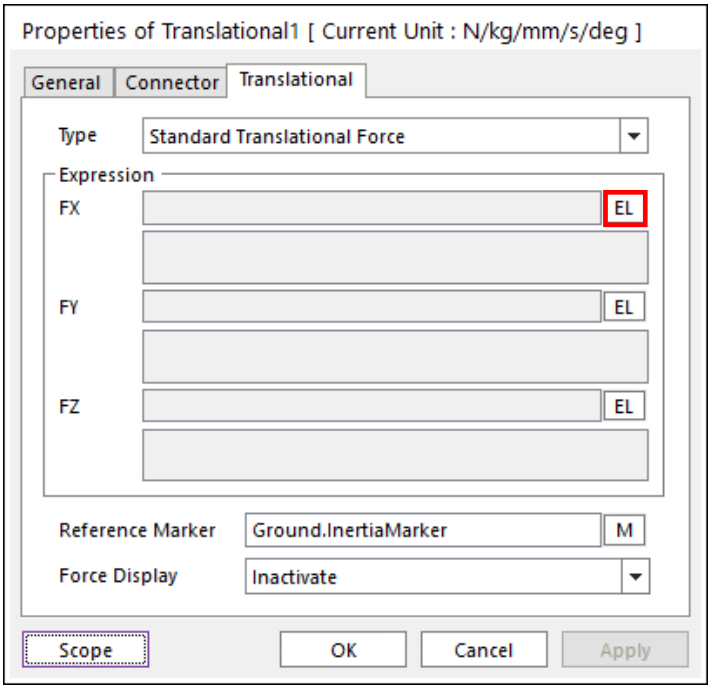
먼저 제어 시스템에서 모델에 입력을 생성합니다. 이 값은 나중에도 정의할 수 있는 값으로 만들어집니다.

To create the Plant Input:

1. **CoLink** 탭의 **CoLink** 그룹에서 **Plant Input** 을 클릭합니다.
2. **Add** 를 클릭합니다.
3. **OK** 를 클릭합니다.

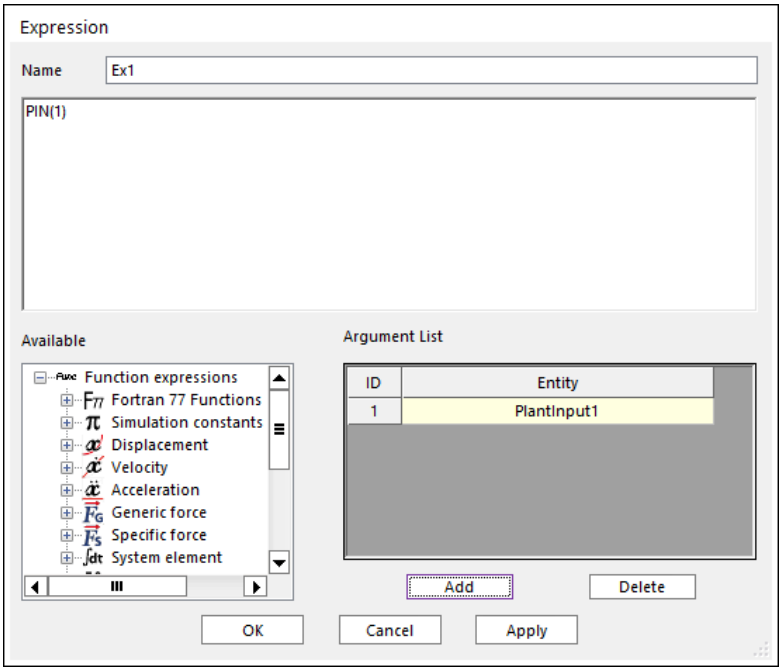


4. **Database window** 에서 **Force** 중 **Translational1** 을 오른쪽 버튼으로 클릭하고 **Properties** 를 클릭합니다.
5. **FX** 의 오른쪽에 있는 **EL** 버튼을 클릭하고 **X** 방향 운동 힘을 정의 합니다.



Expression List 창에서 **Create** 버튼을 클릭합니다.

6. Expression Name 으로 **Ex_transForce** 을 입력합니다.
7. 함수로 **PIN(1)** 입력합니다.
8. **Argument List** 에서, **Add** 를 클릭합니다.
9. **Database window** 에서, **PlantInput1** 을 오른 쪽 그림처럼 첫 번째 **Argument List** 로 끌어 놓습니다.
10. **OK** 를 세 번 클릭하여 모든 설정을 저장합니다.

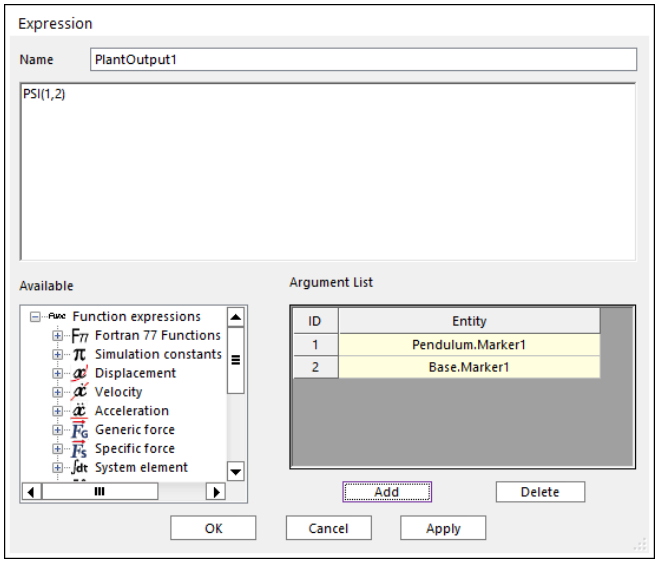


Creating the Plant Outputs

이제 모델의 제어 시스템에 출력을 생성합니다. 출력은 수직에서 측정한 **Pendulum** 의 각도입니다.

To create the plant outputs:

1. **CoLink** 탭의 **CoLink** 그룹에서 **Plant Output** 을 클릭합니다.
2. Plant Output List 창에서 **Add** 를 클릭합니다.
3. 함수로 **PSI(1, 2)**을 입력합니다. 이 함수는 **Pendulum** 과 **BASE** 사이의 회전을 정의하는 오일러 각도인 PSI 각도를 말합니다.
4. **Argument List** 두 개를 만들고 오른쪽 그림과 같이 **RevJoint1** 에 정의된 두 마커를 입력합니다. 첫 번째에 **Pendulum** 의 마커를 입력합니다.
5. **OK** 를 두 번 클릭하여 바뀐 내용을 저장합니다.



Creating the CoLink Model

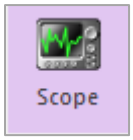
이제 CoLink 을 열고 제어 시스템을 생성합니다. 이것은 블록 다이어그램을 처음부터 만들기 시작합니다. 블록은 RecurDyn 모델, **Gain** 값, 표준 P 컨트롤러, 그래프 출력을 나타내기 위해 만들어 질 것입니다.

To create the CoLink model:

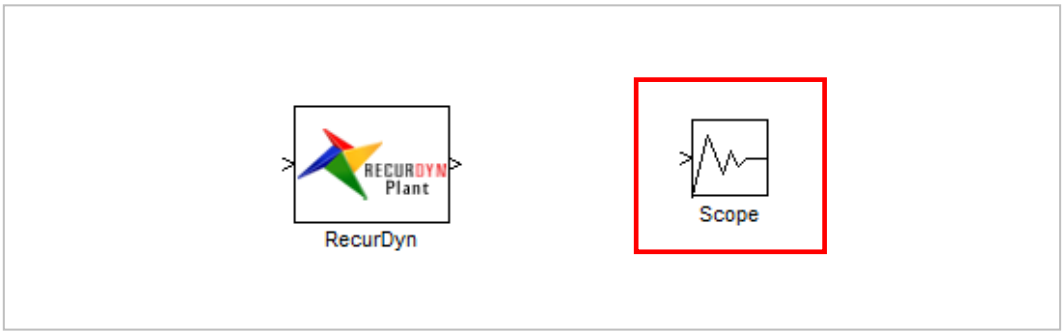
1. **CoLink** 탭의 **CoLink** 그룹에서 **Run CoLink** 를 클릭합니다.

   CoLink 에 빈 모델이 열립니다.

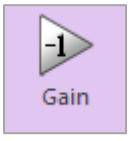
2. **Connector** 탭에서 **Link** 그룹의 **RecurDyn** 블록을 클릭한 후, 아래의 그림과 같이 오른쪽 화면의 3/2 지점에 갖다 놓습니다.



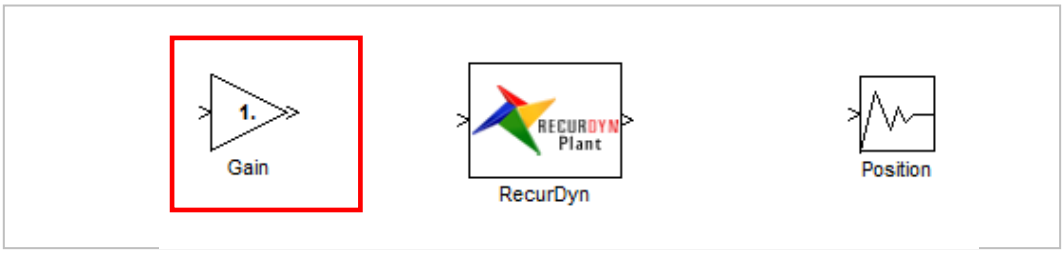
3. **General** 탭에서 **Output** 그룹의 **Scope** 블록을 클릭한 후, 아래의 그림처럼 **RecurDyn** 블록 오른쪽에 위치시킵니다.



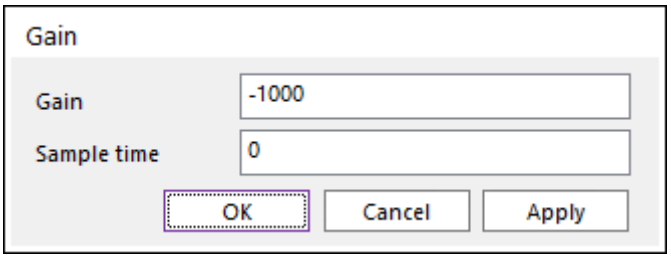
4. **Scope** 블록 아래의 이름을 더블 클릭하여 **Position** 으로 이름을 바꿔줍니다.



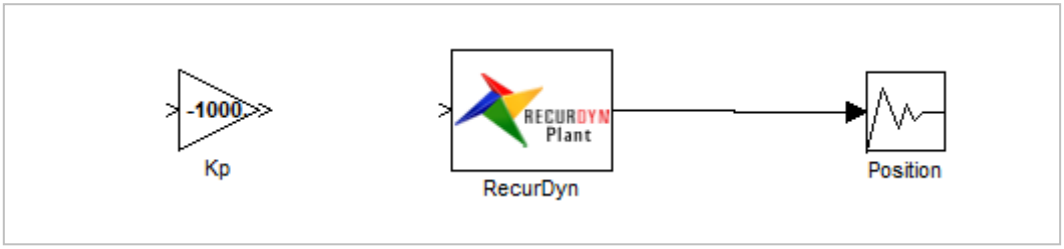
5. **Math** 탭에서 **Math** 그룹의 **Gain** 블록을 클릭한 후, 아래의 그림처럼 **RecurDyn** 블록 왼쪽에 위치시킵니다.



6. **Gain** 블록의 이름을 **Kp** 로 바꿔줍니다. (이름을 더블 클릭하면 수정이 가능합니다.)
7. **Gain** 블록을 더블 클릭하여 수정 모드로 들어갑니다.
8. Gain 값으로 **-1000** 을 입력합니다.
9. **OK** 를 클릭합니다.

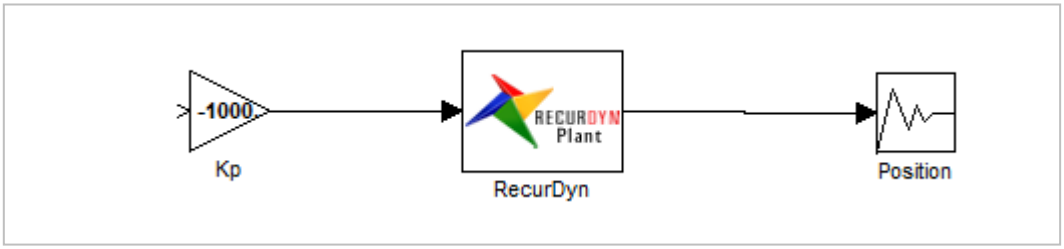


10. 아래의 그림과 같이 **RecurDyn** 블록과 **Position** 블록을 연결합니다. 두 가지 방법이 있습니다. **RecurDyn** 블록을 클릭하고 **Ctrl** 키를 누른 상태에서 **Position** 블록을 클릭합니다. 또는 **RecurDyn** 블록의 오른쪽 화살표를 클릭하여 마우스를 **Position** 블록의



왼쪽 화살표로 옮긴 뒤에 마우스 버튼을 놓아줍니다.

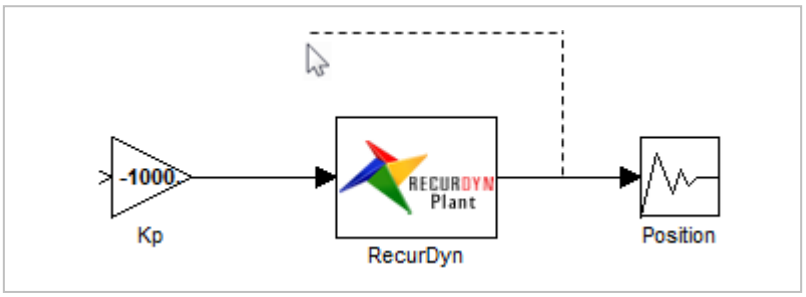
11. **Kp** 블록과 **RecurDyn** 블록을 연결합니다.



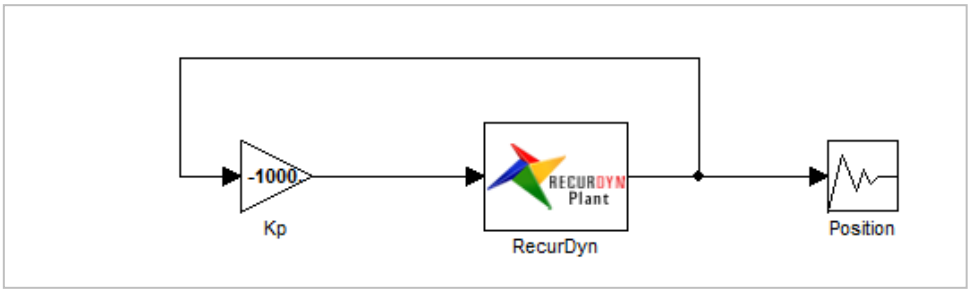
이제 **Kp** Gain 블록과 **Position** Scope 를 연결하는 비례 제어 피드백 루프를 추가할 준비가 되었습니다.

To add a proportional control feedback loop:

1. **RecurDyn** 블록과 **Position** scope 가 연결된 선 위에서 마우스 **우 클릭**으로 드레그 하여 **Kp** 블록입력 쪽으로 이동 후 마우스를 놓아줍니다.



2. 마우스 오른쪽 단추로 처음 클릭한 지점에 교차로를 만듭니다. 다른 선들과 구분 할 수 있도록



수평선을 클릭하고 드레그하여 수직선을 늘릴 수 있습니다.

Save the control system:

1. **File** 메뉴에서 **Save** 선택하거나 **Save** 아이콘을 클릭합니다.
2. CoLink file 을 RecurDyn 모델이 저장된 곳과 같은 폴더에 **Pendulum_P.clk** 이름으로 저장합니다.

Simulating the CoLink Model

위에서 만든 비례 제어 시스템과 **RecurDyn** 모델을 **CoLink** 에서 시뮬레이션 합니다.

To simulate the model with the control system:

1. **CoLink** 에는 상태 창이 없습니다. 그래서, 시뮬레이션을 실행하기 전에 **RecurDyn** 출력 창을 볼 수 있도록 **CoLink** 및 **RecurDyn** 의 창의 위치를 조정해야 합니다.

2. **Quick Access Toolbar** 에서 **Simulation Toolbar** 활성화 합니다.

3. **Simulation Toolbar** 에서 종료 시간을 **5** 초로 바꿔줍니다. 그리고 **Type** 을 **RecurDyn** 변경하고 **Solver** 를 **RecurDynSolver** 으로 변경합니다.

4. **Play** 버튼을 눌려줍니다. **RecurDyn** 출력 창에서 실행 상태를 확인할 수 있어야 합니다.

Tip: Co-simulation 이 실행되지 않는다면 그 이유는?

Co-simulation 이 실행되지 않을 경우, **Server Busy** 대화 상자가 나타날 수 있습니다. 대화 상자가 나타나면:

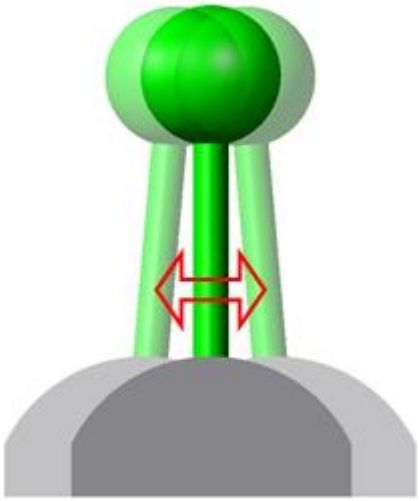
- Switch to 를 클릭하고 RecurDyn 출력 창에 메시지를 검토합니다.

오류 메시지가 CoLink 모델을 찾을 수 없다고 뜬다면, RecurDyn 및 CoLink 모델의 위치를 검토해야 합니다. 두 파일은 같은 폴더에 위치하고 있는지 확인합니다. 그렇지 않다면, 같은 폴더에 두 파일을 놓고 RecurDyn 과 CoLink 다시 시작합니다. 이제 시뮬레이션이 제대로 실행될 것입니다.

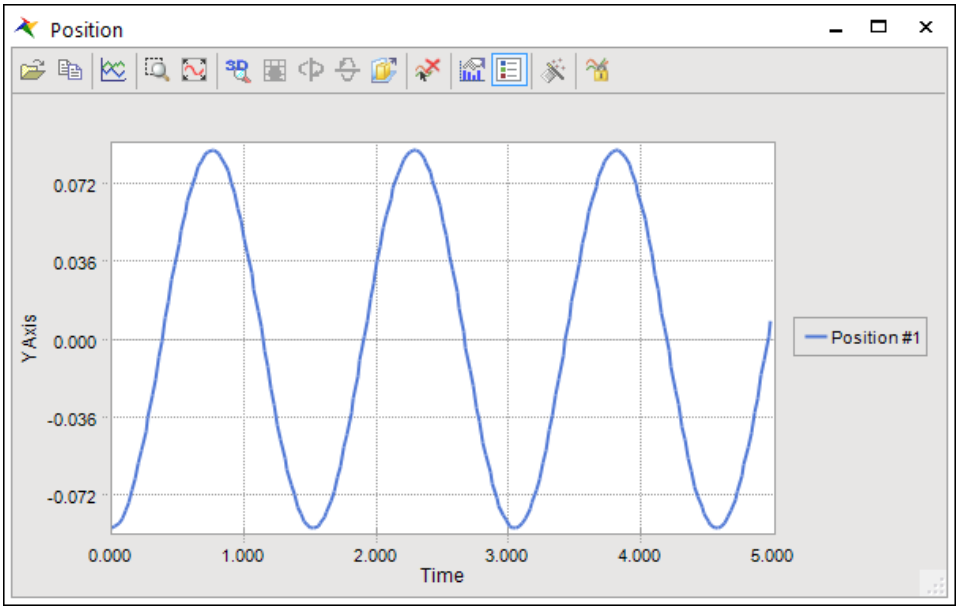
To view the results:

1. **RecurDyn** 창으로 돌아와 에니메이션 **Play** 버튼을 클릭합니다.

   Pendulum 이 좌우로 진동하면서 제어시스템에 의해 수직으로 유지되는 것을 볼 수 있습니다.



2. **CoLink** 창으로 돌아갑니다 그리고 **Position** scope 를 두 번 클릭합니다. 아래의 그림과 같이 **Pendulum** 의 각도 위치 그래프를 볼 수 있습니다.



Pendulum 이 수직으로 유지되지만, 그래프는 시간에 대한 진폭과 진동이 크다는 것을 보여준다. 이것을 해결하기 위해, 다음 장에서 미분 컨트롤을 추가합니다.

Chapter

4

Adding Derivative Control

Task Objective

이 장에서는, 비례-미분 제어(**PD**)가 포함되는 **CoLink** 모델로 수정합니다. 그런 다음 시스템을 시뮬레이션하고 결과를 관찰합니다.

Estimated Time to Complete

10 분

Modifying the RecurDyn Model

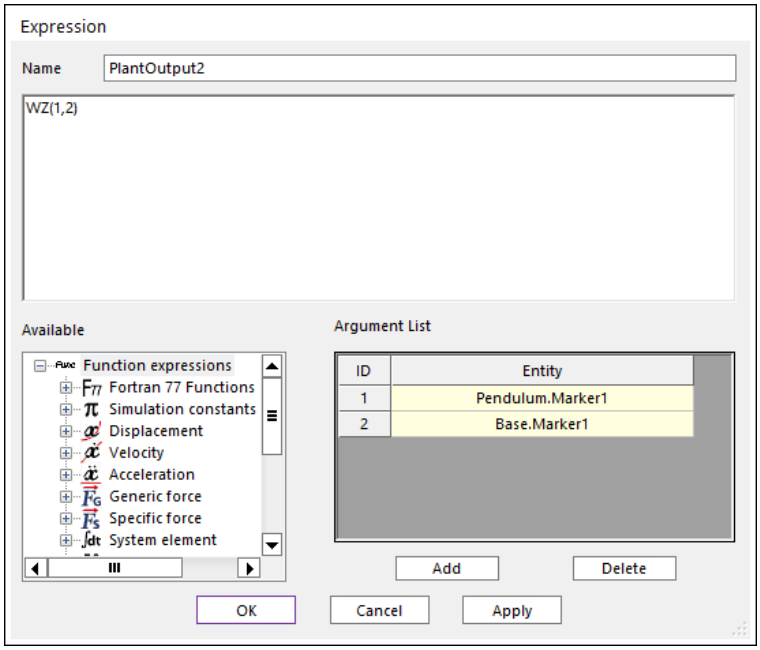
미분 컨트롤을 추가하기 위해서는, 먼저 다른 이름으로 **RecurDyn** 모델을 저장합니다. 그 뒤에 **Penduleum** 위치와 속도(위치의 미분)의 출력을 수정합니다.

To save the model under a different name:

1. **RecurDyn** 창으로 돌아갑니다.
2. **File** 메뉴에서 **Save As** 를 선택합니다.
3. **Pendulum_PD.rdyn** 으로 저장합니다.

To add a plant output for the rotational velocity of the pendulum:

1. **Database window** 에서 **PlantOutput1** 를 우클릭 후 **Properties** 를 클릭하여 Plant Output List 창을 열어줍니다.
2. **Add** 버튼을 클릭합니다.
3. Input 창에 **WZ(1, 2)**을 입력합니다.
4. 오른쪽 그림과 같이 **Argument List** 를 추가하고 좌표를 입력해줍니다.
5. **OK** 를 두 번 클릭하여 바뀐 내용을 저장합니다.



Adding Derivative Control

먼저 다른 파일 이름으로 **CoLink** 모델을 저장하고 다른 피드백 루프를 포함하는 미분 컨트롤로 수정합니다.

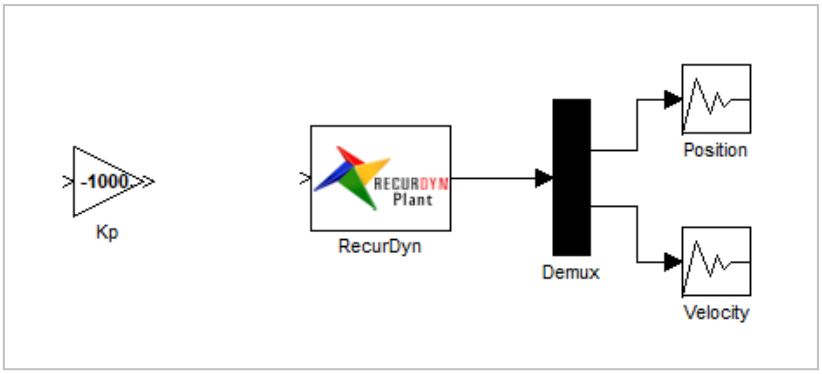
To save the control system under a different name:

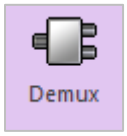
1. **CoLink** 창으로 돌아갑니다.
2. **File** 메뉴에서 **Save As** 를 클릭합니다.
3. **Pendulum_PD.clk** 으로 저장합니다.

To add derivative control:

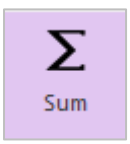
1. 블록을 연결하는 모든 연결 선을 클릭하고 **Delete** 를 클릭하여 지웁니다.

   그림과 같이 만들어 지도록 다음 단계를 따라 합니다:



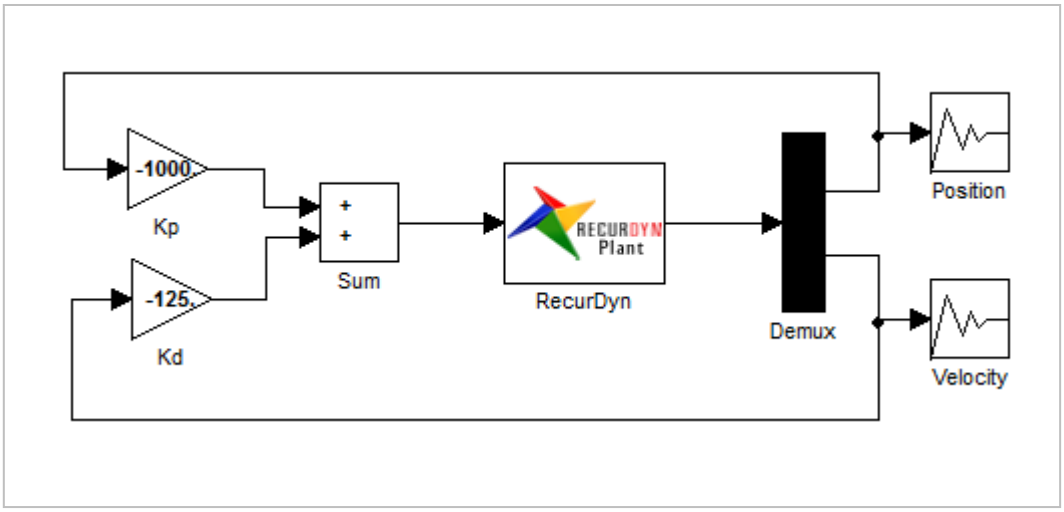


2. **Connector** 탭에서 **Connector** 그룹의 **Demux** 블록을 클릭한 후, **RecurDyn** 블록과 **Position** Scope 블록 사이에 위치 시킵니다.
3. **Position** Scope 아래에 새로운 Scope 를 추가합니다.
   - Scope **이름**을 **Velocity** 으로 바꿉니다.
4. **RecurDyn** 블록과 **Demux** 블록 사이를 연결합니다. 그리고 **Position** 과 **Velocity** Scope 도 연결해줍니다.
5. 아래 그림처럼 다른 Gain 값을 **Kp** Gain 블록처럼 추가합니다.
   - 새로운 **Gain** 블록의 **이름**을 **Kd** 으로 바꿔줍니다.
   - Gain 값은 **-125** 으로 입력합니다.



6. **Math** 탭에서 **Math** 그룹의 **Sum** 블록을 클릭한 후, **Kp** Gain 블록과 **RecurDyn** 블록 사이에 위치시킵니다.

7. Gain 블록들과 **Sum** 블록, 그리고 **RecurDyn** 블록을 아래 그림과 같이 연결합니다.



8. 제어 시스템을 저장합니다.

Simulating the Model with Derivative Control

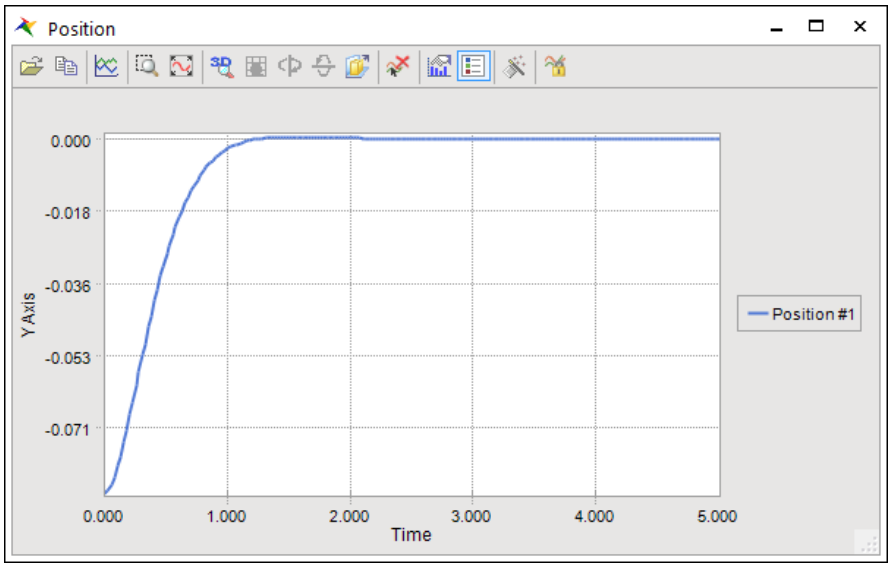
Simulate the model as before.

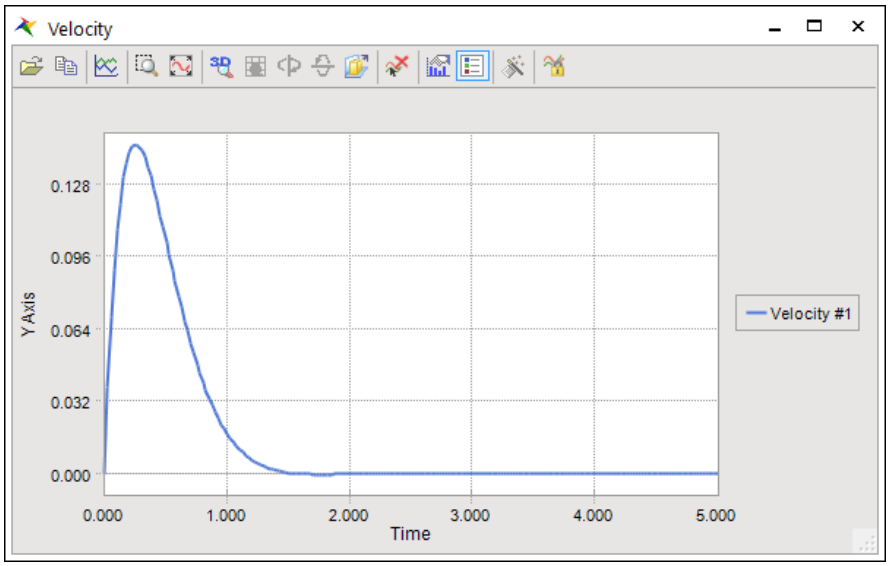
Tip: Run 화살표가 회색일 때는 어떻게 해야 합니까?

드물게 **CoLink Run** 화살표가 회색으로 납니다. 그렇게 되었다면, **CoLink** 모델을 저장하고 닫은 뒤에 **CoLink** 다시 시작하고 모델을 불러옵니다.

To view the results:

1. **Position** 과 **Velocity Scope** 를 더블 클릭합니다. 다음과 같은 결과를 볼 수 있을

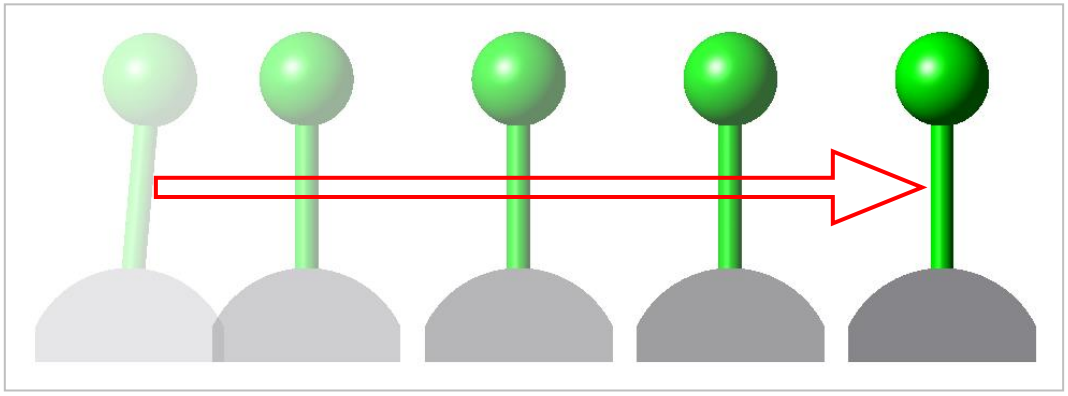




것입니다:

결과가 훨씬 좋아 보입니다. 진동했던 이전의 값 대신 각도 위치와 진자의 속도가 모두 지금은 제로에 수렴합니다.

2. **RecurDyn** 창으로 돌아옵니다.
3. 에니메이션을 실행시켜봅니다.



에니메이션에서 Pendulum 이 똑바로 수직을 유지하려는 동안, 시스템이 오른쪽으로 이동하는 것을 보여줍니다. 이동을 줄이기 위해, 다음 장에서는 적분 컨트롤을 추가합니다.

Chapter

5

Adding Integral Control

Task Objective

이 장에서는, 비례-적분-미분 제어(**PID**)가 포함되는 **CoLink** 모델로 수정합니다. 그런 다음 시스템을 시뮬레이션하고 결과를 관찰합니다.

Estimated Time to Complete

5 분

Adding Integral Control

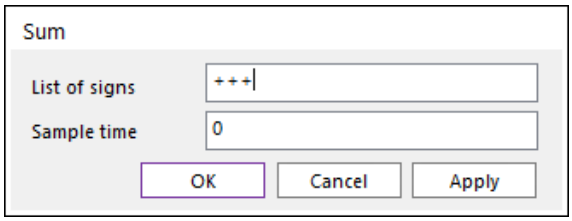
먼저 다른 이름으로 **CoLink** 모델을 저장합니다. 다른 피드백 루프를 포함하는 적분 컨트롤로 수정합니다.

To save the control system under a different name:

1. **File** 메뉴에서 **Save As** 를 선택합니다.
2. **Pendulum_PID.clk** 으로 저장합니다.

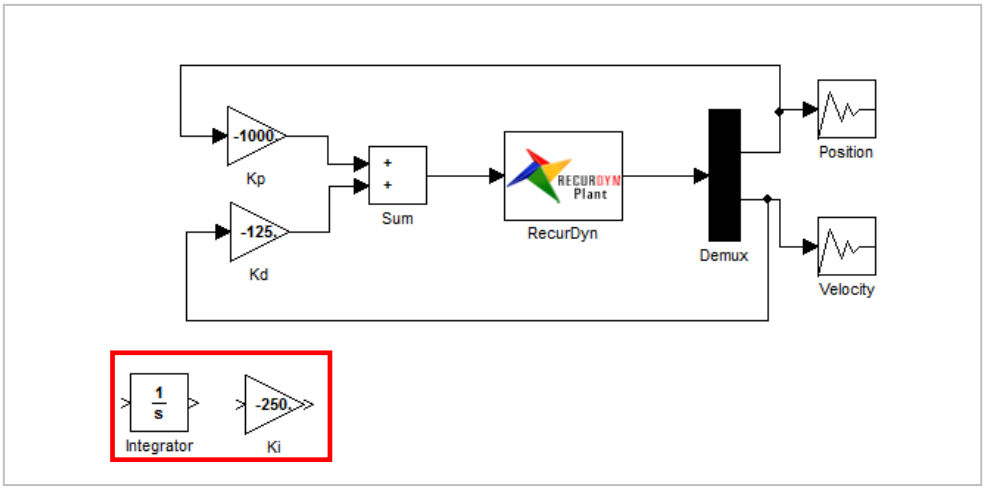
To add derivative control:

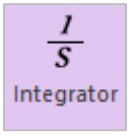
1. **Sum** 블록을 더블 클릭합니다.
2. **List of signs** 를 **+++**로 수정합니다. **Sum** 블록의 입력을 세 개로 만들어줍니다.



3. **OK** 를 클릭합니다.

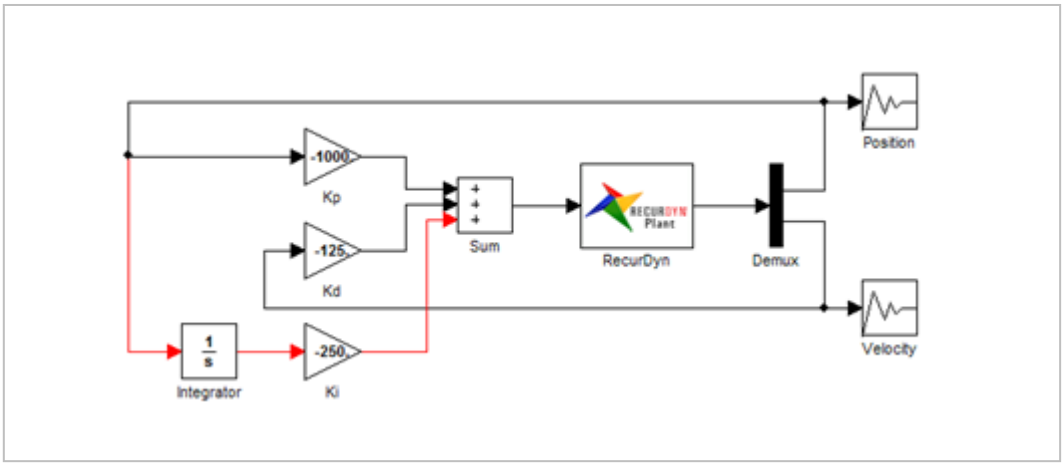
   그림과 같이 만들어 지도록 다음 단계를 따라 합니다:





4. **Continuous and Discrete** 탭에서 **Continuous** 그룹의 **Integrator** 블록을 클릭한 후, **Kd** Gain 블록 왼쪽 아래에 위치시킵니다.
5. 모델에 새로운 Gain 블록을 **Kd** Gain 블록 아래에 추가합니다.
   - **Gain 블록**의 **이름**을 **Ki** 으로 바꾸어줍니다.
   - Gain 값을 **-250** 으로 입력합니다.

6. 아래의 그림의 빨간 선과 같이 블록들을 연결합니다.



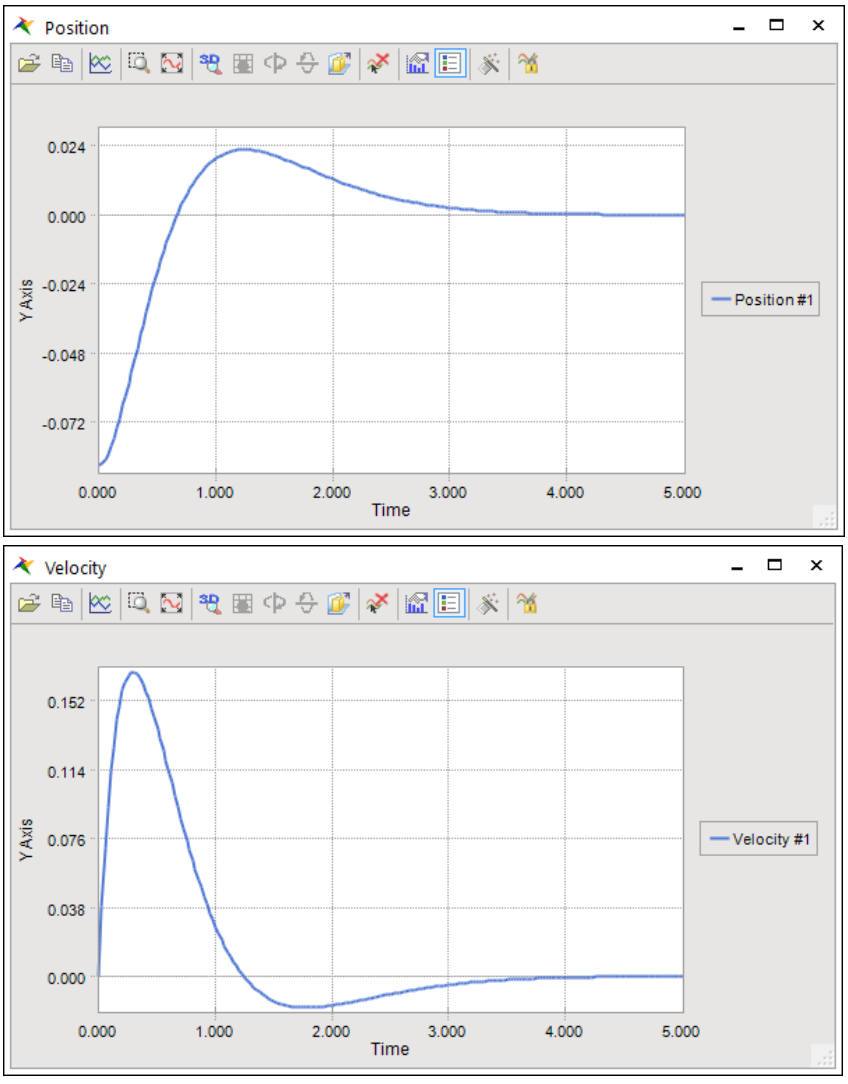
7. 제어 시스템을 저장합니다.

Simulating the Model with PID Control

Simulate the model as before.

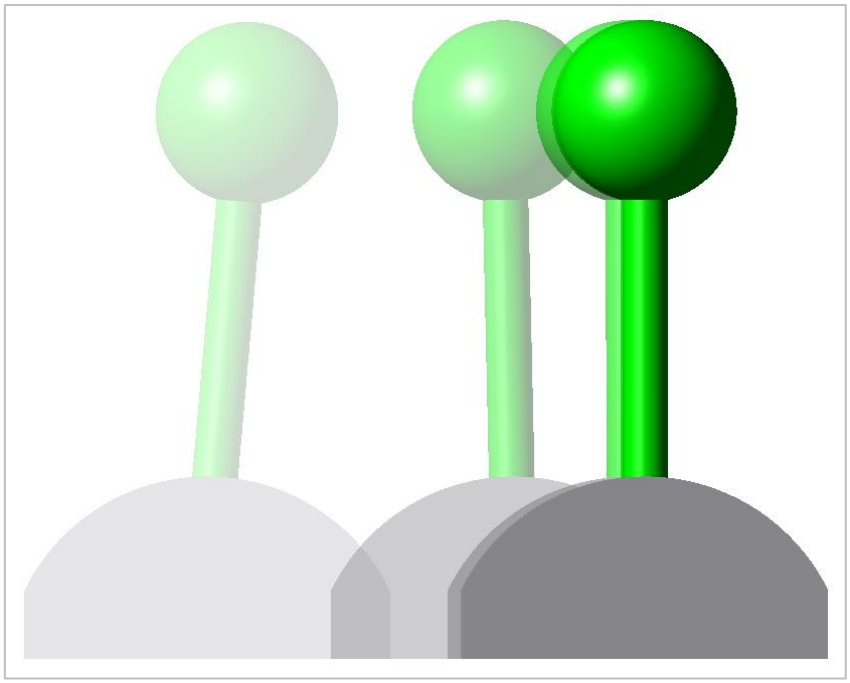
To view the results:

1. **Position** 과 **Velocity** Scope 를 더블 클릭합니다. 다음과 같은 결과를 볼 수 있을 것입니다:



0 에 수렴하기 위한 위치 응답의 일부에 약간의 오버 슈트가 있습니다.

2. **RecurDyn** 창으로 돌아옵니다.
3. 에니메이션을 실행시켜봅니다.



이제 애니메이션은 진자가 똑바로 유지 하는 것을 보여줍니다. 그리고 앞에서 본 애니매이션보다 Base 바디가 원래 있는 위치 근처에서 움직임이 멈추게 됩니다. 여러 종류의 제어 피드백 루프가 추가됨에 따라 제어 시스템은 시스템 안정화에 큰 영향을 미칩니다.

Thanks for participating in this tutorial!