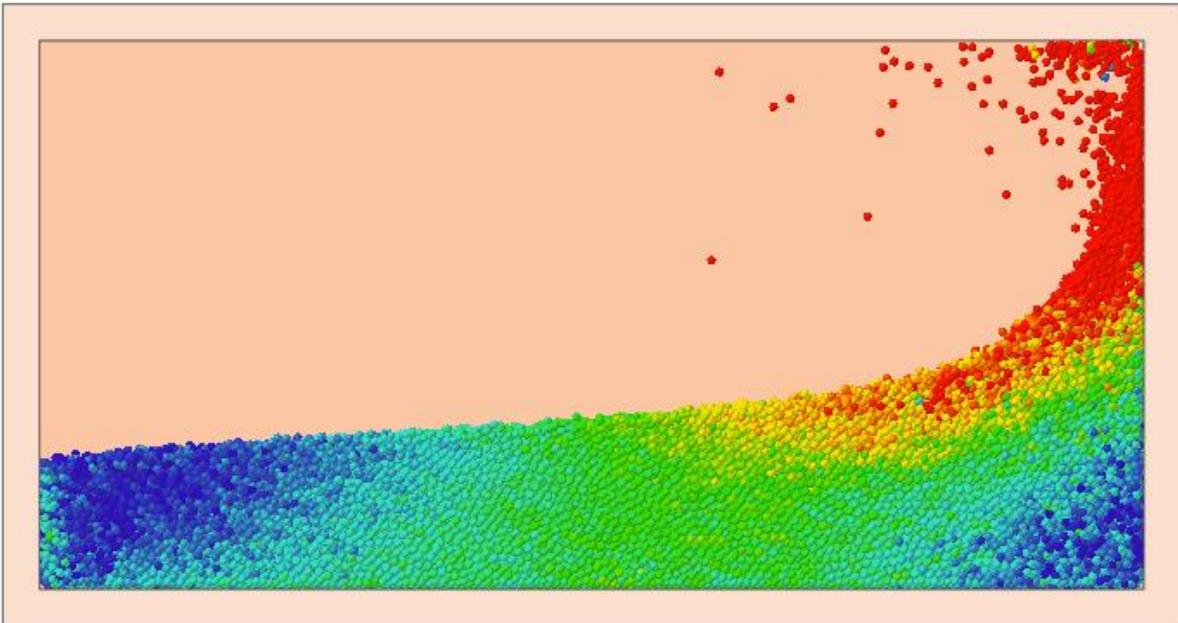




Water Sloshing (Particleworks)



Copyright © 2020 FunctionBay, Inc. All rights reserved.

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

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

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

Registered Trademarks of FunctionBay, Inc. or Subsidiary

RecurDyn is a registered trademark of FunctionBay, Inc.

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

Edition Note

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

목차

개요	5
목적	5
필요 요건	6
과정	6
RecurDyn 리본에 Particleworks UI 등록	7
목적	7
예상 소요 시간	7
Configuration XML 파일 가져오기	8
RecurDyn 모델 생성	11
목적	11
예상 소요 시간	11
RecurDyn 시작하기	12
Geometry 생성하기	12
Translate Joint 생성하기	14
Wall 생성하기	16
*.wall 파일 내보내기	16
동역학 모델 해석하기	17
Particleworks 모델 생성	18
목적	18
예상 소요 시간	18
Particleworks 시작하기	19
Preprocess 설정하기	20
Co-simulation 준비하기	27
Co-simulation	29
목적	29
예상 소요 시간	29
Co-simulation	30
RecurDyn Animation 보기	32
Plot 보기	34
Particleworks Postprocessing	35
목적	35
예상 소요 시간	35
Particleworks Animation 보기	36
Surface 생성하기	39
결과 분석 및 검토	41

목적	41
예상 소요 시간	41
결과 비교 분석하기.....	42

Chapter

1

개요

본 교재는 **RecurDyn** 과 **Particleworks** 두 소프트웨어 간의 Co-simulation 하는 방법을 다루고 있습니다. **RecurDyn** 은 기구해석 부분을 담당하고, **Particleworks** 는 MPS(Moving Particle Simulation)법을 이용해 유체해석을 담당합니다. 본 교재에서는 두 소프트웨어를 사용하여 강체의 움직임에 따른 유체의 거동을 해석하게 됩니다.

본 교재에서 다루게 될 모델은 논문에서 발췌한 유체 슬로싱(**Sloshing**) 실험 모델로서, 유체를 담고 있는 사각탱크를 좌우로 움직였을 때 유체의 거동과 압력결과를 분석하는 실험입니다. 슬로싱 문제는 유체운동에서 두드러진 현상 중 하나이며, 극심한 슬로싱 유동은 유체가 주는 충격으로 인해 용기와 주변 구조물까지 파손 시킬 우려가 있어 많은 연구가 진행되어 왔습니다. 본 교재에서 참조한 논문은 유체해석 방법 중 하나인 CIP(Constrained Interpolation Profile)법을 이용하여 해석한 결과를 실험을 통해 얻은 결과와 비교 분석하는 내용을 다루고 있습니다. 본 교재에서도 논문 구성과 동일하게 **Particleworks**(MPS 법)로 해석한 결과와 실험의 결과를 비교 분석하는 내용을 다루고자 합니다.

참조 논문: Numerical simulation of violent sloshing by a CIP-based method, Kisev et al(2006)

목적

본 교재에서 다루고자 하는 내용은 다음과 같습니다.

- **RecurDyn** 을 통한 강체 모델 생성 및 *.wall 파일 내보내는 방법
- **Particleworks** 에서 입자들을 생성하는 방법
- **Particleworks** 에서 유체 물성을 설정하는 방법
- **RecurDyn** 에서 Co-simulation 을 수행하는 방법
- **Particleworks** 에서 Post-processing 을 수행하는 방법

필요 요건

- 본 교재는 RecurDyn 에서 제공하는 Basic Tutorial 을 사전에 숙지한 사용자를 위한 것입니다. 따라서 본 교재를 사용하기 위해서는 앞서 언급된 교재를 선행해야 본 교재의 이해를 높일 수 있습니다.
- 본 교재를 진행하기 위해서는 Particleworks 소프트웨어가 설치되어 있어야 합니다. 본 교재는 Particleworks 6.2.0 버전으로 진행하였습니다.
- 본 교재는 그래픽카드 NVIDIA GeForce GTX TITAN Black 으로 해석을 진행하였으며, 컴퓨터의 사양 및 소프트웨어의 버전에 따라 해석결과에 미소한 차이가 있을 수 있습니다.

과정

본 교재는 다음의 과정들로 구성되어 있습니다. 각각의 과정을 완성하기까지 걸리는 시간은 아래의 표와 같습니다.

(*소요시간(분)은 컴퓨터의 사양과 숙련도에 따라 달라질 수 있습니다.)

과정	시간(분)
RecurDyn 리본에 Particleworks GUI 등록	10
RecurDyn 모델 생성	15
Particleworks 모델 생성	15
Co-simulation	120
Particleworks Post-processing	30
결과 분석 및 검토	5
총합	195

Chapter

2

RecurDyn 리본에 Particleworks UI 등록

RecurDyn 리본 GUI에는 기본적으로 **External SPI(Particleworks)** GUI가 보이지 않습니다. 별도로 제공되는 **Configuration XML** 파일을 사용하여 **RecurDyn**에 GUI를 추가해야 합니다.

목적

본 장에서는 **Particleworks** 소프트웨어에서 제공하는 **Configuration XML** 파일을 사용하여 **RecurDyn** 리본에 GUI에 **External SPI(Particleworks)** 탭을 추가하는 방법과 Particle Solver DLL을 세팅하는 방법을 배우게 됩니다.



예상 소요 시간

10 분

Configuration XML 파일 가져오기

Particleworks.xml 파일 복사하기

Particleworks 소프트웨어 설치경로에 있는 Particleworks.xml 파일을 복사합니다.

- <Particleworks Install Path>\module\Particleworks.xml

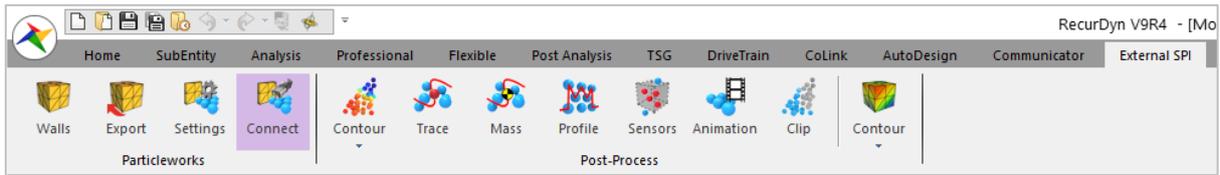
RecurDyn 폴더에 붙여넣기

위에서 복사한 Particleworks.xml 파일을 아래 경로에 붙여넣습니다.

- <RecurDyn Install Path>\Bin\Solver\CoSim\StdParticleInterface\Particleworks.xml

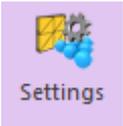
RecurDyn GUI 확인하기

RecurDyn 을 실행해보면 아래 그림과 같이 리본 GUI 에 External SPI 탭이 생성되고 하위에 Particleworks 그룹이 생성됩니다.

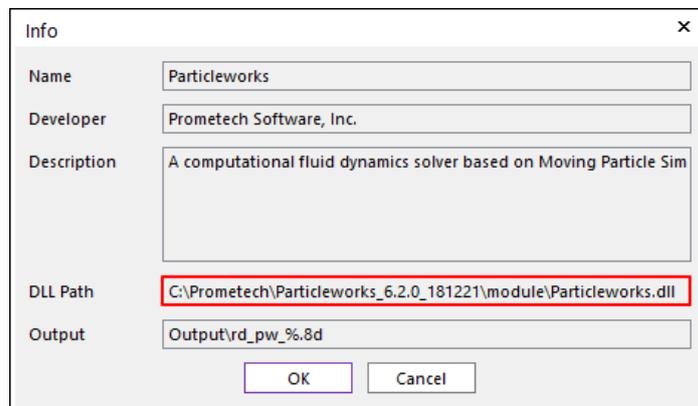


Particle Solver DLL 경로 확인하기

Particle Solver DLL 파일이 있어야 할 경로를 확인합니다.



1. External SPI 탭의 Particleworks 그룹에서 Settings 를 클릭합니다.
2. 대화상자가 나타나면 Info 버튼을 클릭합니다.



Info 대화상자에서 **DLL Path** 를 확인할 수 있습니다. 이 값은 Particleworks 의 기본 설치 위치로 설정되어 있기 때문에 Particleworks 를 다른 경로에 설치하였다면 Configuration XML 파일에서 DLL Path 를 수정해 줘야 합니다.

Tip: Configuration XML 에서 Particle Solver DLL Path 수정하기

(Info 의 DLL Path 가 다른 경우 진행)

1. Particleworks.xml 파일을 엽니다.
2. 아래 그림과 같이 **<Path>** 뒤에 적힌 DLL 경로를 알맞게 수정합니다.

```

<?xml version="1.0"?>
<!-- The first letters of names of elements are capitalized and names of attributes are v
<!-- Any element for which support is optional must have the attribute "supported" with t
<!-- If there are multiple supported options of an element, then the element can have an
<!-- The names of elements in this file cannot be changed. -->

<!-- Configuration : required -->
<!-- Requires the attribute "type" and "version"-->
<!-- The value of the attribute "type" must be "Embedded" or "Independent" -->
<!-- External particle solvers should use 'type="Independent"'. -->
<Configuration type="Independent" version="1010">
  <!-- Details : required -->
  <Details>
    <!-- Name : required -->
    <!-- This text will be used as the name of Ribbon Group icon in RecurDyn to ident
    <Name>Particleworks</Name>

    <!-- Developer : optional -->
    <Developer>Prometech Software, Inc.</Developer>

    <!-- Description : optional -->
    <Description>A computational fluid dynamics solver based on Moving Particle Simul

    <!-- Path : required -->
    <!-- The path of the dll that RD will load to connect to the particle solver -->
    <Path>C:\Prometech\Particleworks_6.2.0_181221\module\Particleworks.dll</Path>

    <!-- OutputName : required -->
  
```

3. **Configuration XML** 파일을 저장합니다.
 4. **Configuration XML** 이 정상적으로 수정된 것을 확인한 후 **RecurDyn** 을 재시작 합니다.
-

Chapter

3

RecurDyn 모델 생성

본 교재에서 **RecurDyn** 은 동역학모델 생성과 더불어 **Particleworks** 에서 필요한 파일을 제공하는 역할을 합니다. 이번 장에서는 좌우로 슬로싱하는 동역학 모델을 생성하고 **Particleworks** 에서 필요한 파일을 내보냅니다.

목적

본 장에서는 해석에 필요한 동역학 모델을 생성하는 방법과 **Particleworks** 에서 필요한 파일을 내보내는 방법을 배우게 됩니다.



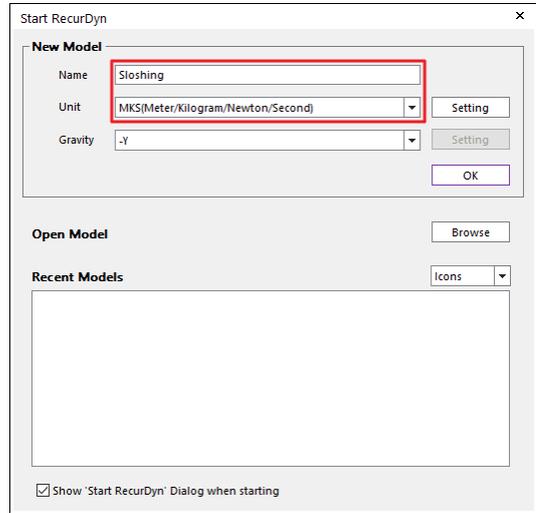
예상 소요 시간

15 분

RecurDyn 시작하기

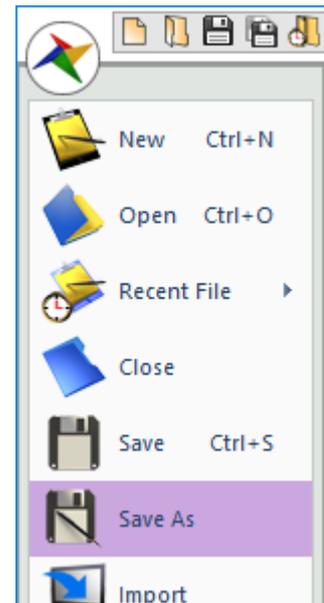
새 모델 생성하기

1. **RecurDyn** 을 실행합니다.
RecurDyn 이 실행되면서 **Start RecurDyn** 대화상자가 나타납니다.
2. **Model Name** 입력란에 **Sloshing** 을 입력합니다.
3. **Unit** 을 **MKS** 단위계로 변경합니다.
4. **OK** 를 눌러 새 모델을 생성합니다.



모델 저장하기

- **File** 메뉴에서, **Save As** 를 클릭하여 원하는 위치에 **Sloshing.rdyn** 으로 저장합니다.
- (본장에서 생성된 모델은 3 장에서 Particleworks 프로젝트 폴더로 옮겨집니다.)



Geometry 생성하기

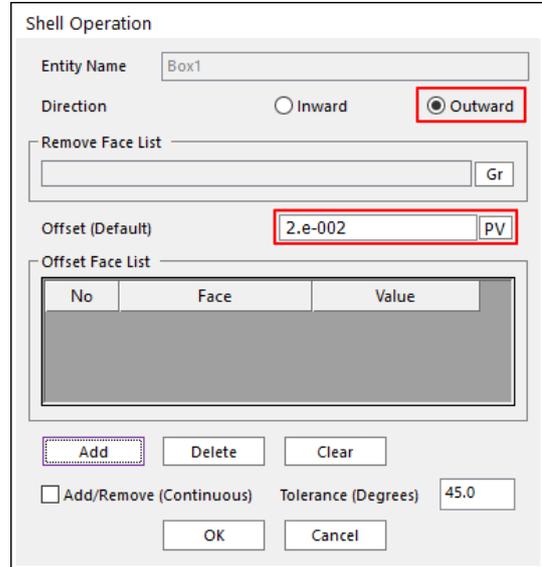
유체를 둘러싸는 Container Geometry 를 생성합니다.



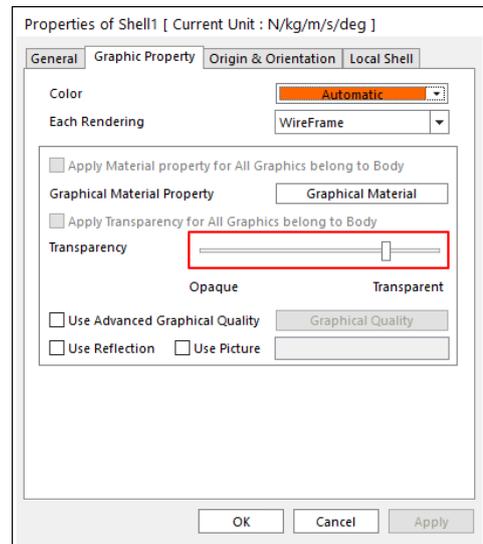
1. **Working Window** 를 **XY** 평면으로 변경합니다.
2. **Professional** 탭의 **Marker and Body** 그룹에서 **Box** 를 클릭합니다.
3. 생성 방법을 **Point, Point, Depth** 로 변경합니다.
4. 입력란에 아래 값들을 입력합니다.
 - **Point1: -0.3, 0, 0**
 - **Point2: 0.3, 0.3, 0**
 - **Depth: 0.05**



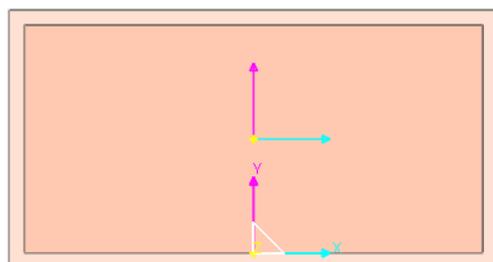
5. 생성된 **Body1** 의 이름을 **Container** 로 변경합니다.
6. **Container** Body 의 Edit 모드에 들어갑니다.
7. **Geometry** 탭 **Local** 그룹에서 **Shell** 을 클릭합니다.
8. **Working Window** 에서 **Box1** 을 선택합니다.
9. **Shell Operation** 대화상자가 뜨면 오른쪽 그림과 같이 입력합니다.
 - Direction: Outward
 - Value: 2.e-002
10. **OK** 를 클릭하여 대화창을 닫습니다.



11. 생성된 **Shell1** 의 Property 대화상자에서 **Graphic Property** 탭의 **Transparency** 를 높입니다.



두께가 0.02 미터인 Shell 형태의 Geometry 가 생성되었음을 확인합니다.



12. **Edit** 모드에서 나옵니다.

Translate Joint 생성하기

Container Body 를 좌우로 흔들기 위한 Joint 를 생성합니다.



1. **Professional** 탭의 **Joint** 그룹에서 **Translate** 를 클릭합니다.
2. 생성 방법을 **Body, Body, Point, Direction** 로 설정합니다.
3. 입력란에 아래의 값들을 입력합니다.
 - **Body1: Ground**
 - **Body2: Container**
 - **Point: 0, 0.15, 0**
 - **Direction: 1, 0, 0**
4. **TraJoint1** 의 Property 대화상자를 띄웁니다.
5. **Include Motion** 옵션을 선택하고, **Motion** 버튼을 클릭합니다.
6. Type 을 **Displacement** 로 설정하고 수식을 입력하기 위해 EL 버튼을 클릭합니다.
7. **Create** 버튼을 눌러 아래 값을 입력하여 Expression 을 생성합니다.
 - **Name: Ex_Sloshing**
 - **Value: $0.05 \cdot \sin(2 \cdot \pi / 1.3 \cdot \dim(\text{time}, 2))$**

Expression

Name

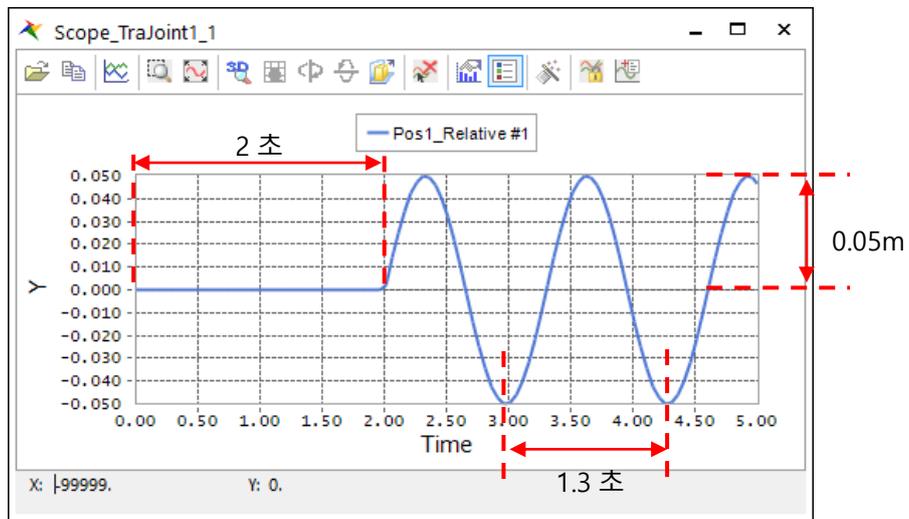
Available

- [-] Func Function expressions
- [F77] Fortran 77 Functions
- [π] Simulation constants
- [D] Displacement
- [V] Velocity
- [A] Acceleration
- [G] Generic force
- [F] Specific force
- [Jdt] System element

Argument List

ID	Entity

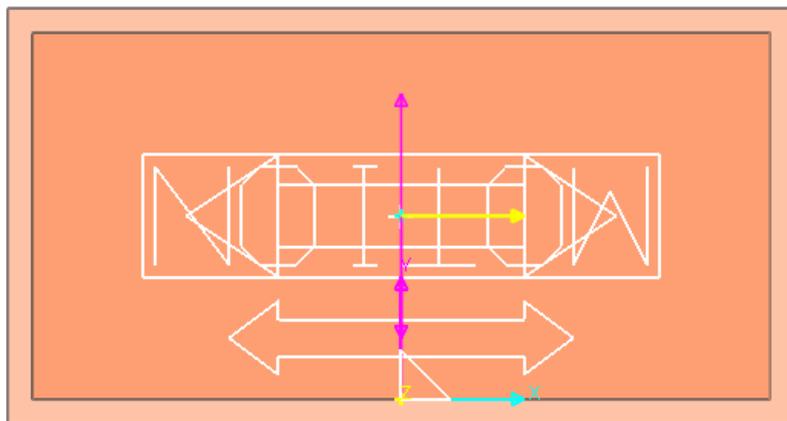
위의 수식은 2 초부터 1.3 초의 주기로 0.05m 진폭을 그리는 식입니다. 2 초의 지연시간은



유체입자의 초기 안착을 위한 것입니다.

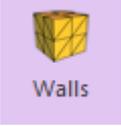
8. **OK** 를 눌러 모든 대화상자를 닫고, **Expression** 을 적용시킵니다.

지금까지 **RecurDyn** 에서 필요한 모든 모델링이 완료되었습니다. 이제 **Particleworks** 와 Co-simulation 하기 위해 **Wall** 을 생성하도록 하겠습니다.



Wall 생성하기

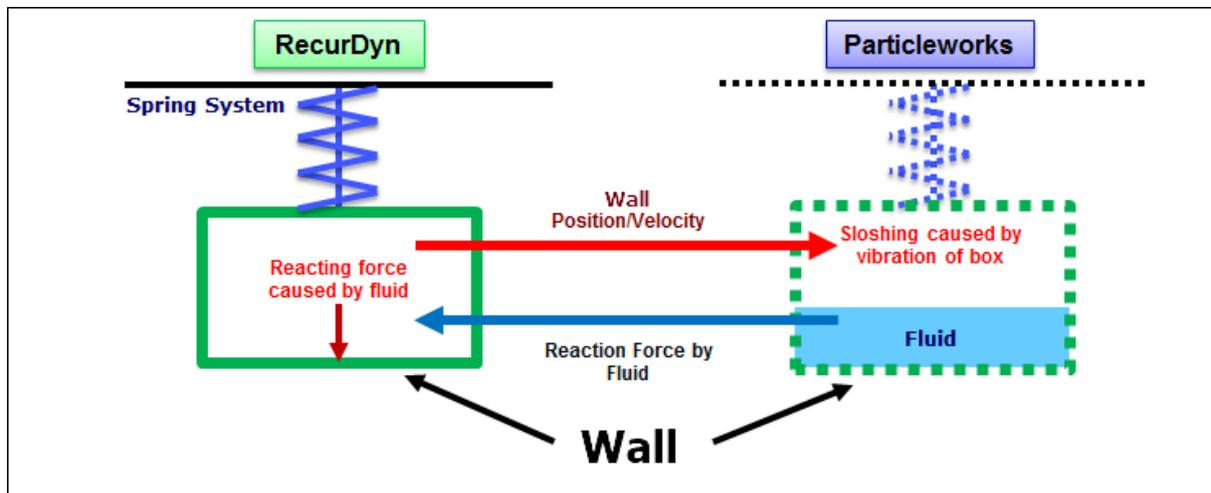
생성된 **Container** Body 에 대하여 Wall 을 생성해 줍니다.



1. **External SPI** 탭의 **Particleworks** 그룹에서 **Walls** 를 클릭합니다.
2. **Working Window** 에서 Solid 로서 **Container.Shell1** 을 클릭합니다.

Note: Wall 이란?

Wall 은 유체와 접하는 강체를 정의하는 Entity 이다. **RecurDyn** 은 Wall 을 통해 유체력에 대한 데이터를 받고 **Particleworks** 는 Wall 을 통해 강체의 움직임에 대한 데이터를 받는다.



*.wall 파일 내보내기



1. **External SPI** 탭의 **Particleworks** 그룹에서 **Export** 를 클릭합니다.
2. 대화상자가 나타나면 저장할 폴더를 찾아 선택 후 **OK** 를 클릭하여 저장합니다.

저장된 폴더에 **rd_pw.wall** 파일과 **WallGeometries** 폴더가 생성됩니다. 본 장에서 생성된 파일들은 4 장에서 Particleworks 프로젝트 폴더로 옮겨집니다.

Note:

WallGeometries 폴더에는 Wall Geometry 에 대한 파일들(*.obj or *.stl)이 저장됩니다. 그리고 **rd_pw.wall** 파일에는 Wall Geometry 의 위치 자세에 대한 정보들이 들어있습니다.

동역학 모델 해석하기

RecurDyn 단독 해석하기

Particleworks 와 Co-simulation 하기 전에 생성된 모델이 정상적으로 움직이는지 확인해 볼 필요가 있습니다. **RecurDyn** 만 단독 해석을 수행하기 위해 **Connect** 상황을 해지합니다.



1. **External SPI** 탭의 **Particleworks** 그룹에서 **Connect** 를 비활성화합니다.



2. **Analysis** 탭의 **Simulation Type** 그룹에서 **Dyn/Kin** 을 클릭합니다.
3. 아래와 같이 옵션을 설정합니다.
 - **End Time:** 14
 - **Step:** 1400
4. **Simulate** 버튼을 클릭하여 해석합니다.

Animation 확인하기

- 해석이 완료되면 애니메이션을 Play 해봅니다.
- **Container Body** 가 좌우로 움직이는 것을 확인할 수 있습니다. 동역학 모델링이 모두 완료되었습니다. 이제 모델을 저장한 후, **RecurDyn** 을 닫고 **Particleworks** 의 모델링을 진행하도록 합니다.

Chapter

4

Particleworks 모델 생성

Particleworks에는 여러 방법으로 유체입자를 생성할 수 있습니다. 본 교재에서는 정의된 평면으로부터 Wall의 경계면까지 입자를 채우는 방식을 사용합니다.

목적

본 장에서는 유체입자를 생성하는 방법과 물성을 입력하는 방법 그리고 해석환경을 설정하는 방법을 배우게 됩니다.



예상 소요 시간

15 분

Particleworks 시작하기

새 모델 생성하기

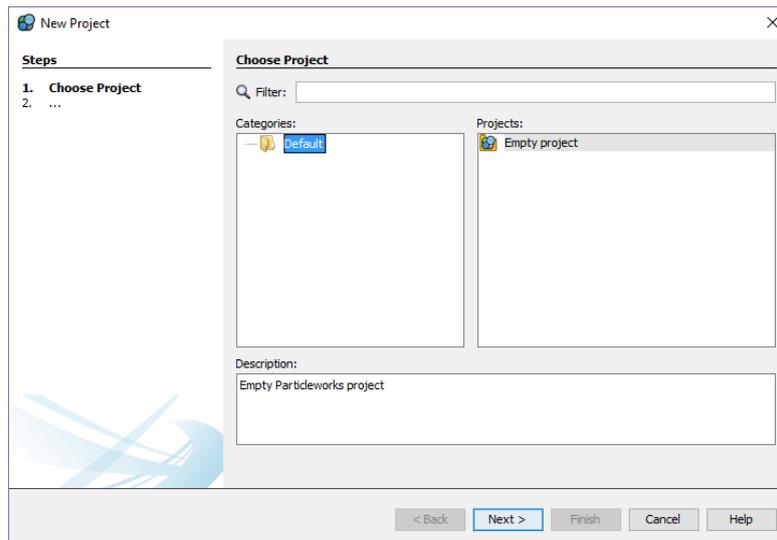


1. 바탕화면에서 **Particleworks** 아이콘을 더블 클릭합니다.



2. **File** 탭의 **New Project** 를 클릭합니다.

New Project 대화상자가 나타납니다.



3. **Next** 를 클릭합니다.

4. **Project Name** 입력란에 **Sloshing** 을 입력합니다.

5. **Project Location** 입력란에 프로젝트가 생성될 위치를 입력합니다.

6. **Finish** 를 눌러 새 모델을 생성합니다.

RecurDyn 모델 및 Wall 관련 파일 복사하기

두 소프트웨어가 Co-simulation 을 하기 위해서는 **RecurDyn** 모델과 **Wall** 파일이 반드시 **Particleworks** 프로젝트 폴더 안에 있어야 합니다.

- 3장에서 생성된 Sloshing.rdyn 파일, rd_pw.wall 파일 그리고 WallGeometries 폴더를 Particleworks 프로젝트가 생성된 폴더 안에 존재하는 scene 폴더에 옮겨 놓습니다.
- (폴더 경로: <ProjectLocation>/Sloshing/scene)

Preprocess 설정하기

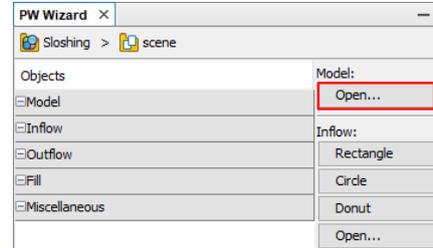
Preprocess 는 입자 생성부터 환경 설정까지 모델의 전반적인 시스템을 정의하는 과정입니다.

Wall 파일 불러오기



1. **Simulation** 탭의 **Start wizard** 를 클릭합니다.

우측에 **PW Wizard** 대화상자가 나타납니다.



2. **Open** 버튼을 클릭하여 **rd_pw.wall** 파일을 불러옵니다.

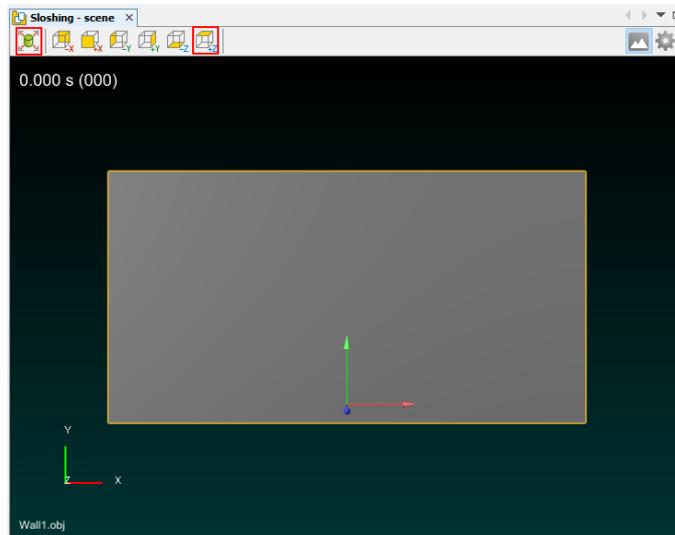
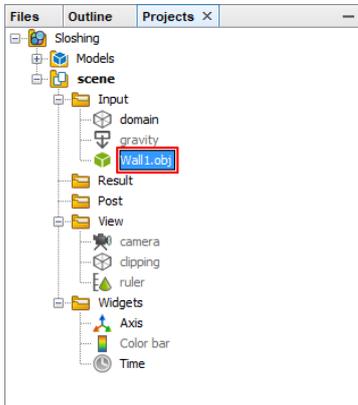
- <ProjectLocation>/Sloshing/scene/rd_pw.wall



3. 불러온 Wall 을 자세히 보기 위해 **Working Window** 상단에 **Fit** 버튼과 **+Z** 평면 버튼을 클릭합니다.



아래 그림과 같이 좌측 **Projects** 대화상자의 scene > Input 하위를 보면 **Wall1.obj** 파일이 정상적으로 들어왔음을 확인할 수 있습니다. **Working Window** 를 확인해보면 불러온 Wall 파일의 형상이 아래와 같이 나타납니다.



Wall1.obj 투명도 설정하기

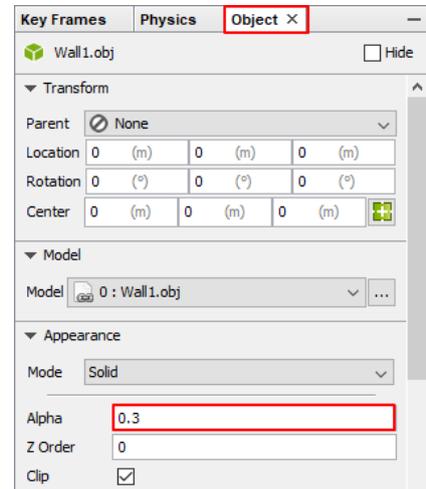
두께가 있는 형상으로 구성된 **Wall1.obj** 의 속이 보이지 않으므로 투명도를 설정해봅시다.

1. **Projects** 대화상자에서 scene > Input 하위의 **Wall1.obj** 를 더블 클릭 합니다.

클릭한 Entity 에 관련된 **Object** 대화상자가 오른쪽 그림과 같이 보여집니다.

2. **Appearance** 의 **Alpha** 값을 **0.3** 으로 변경한 후 **Enter Key** 로 입력합니다.

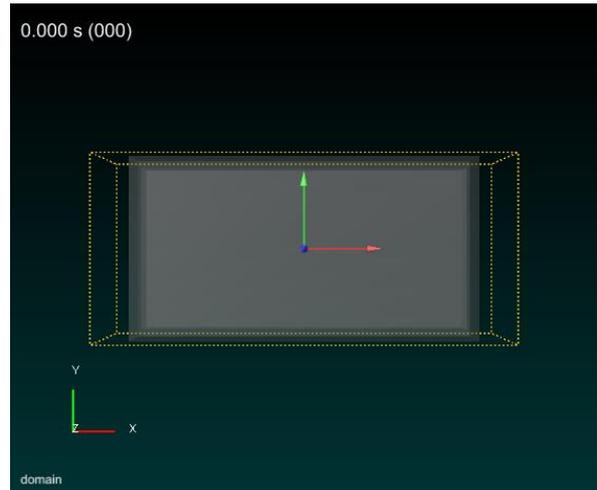
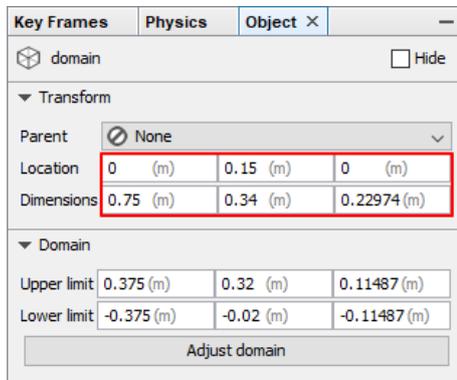
Wall1.obj 이 투명하게 변경되어 보입니다.



Domain 설정하기

Domain 은 유체입자의 해석이 이루어지는 영역을 의미합니다. **Wall1** 이 좌우로 이동하므로 입자가 움직일 수 있는 모든 영역을 포함해야 합니다.

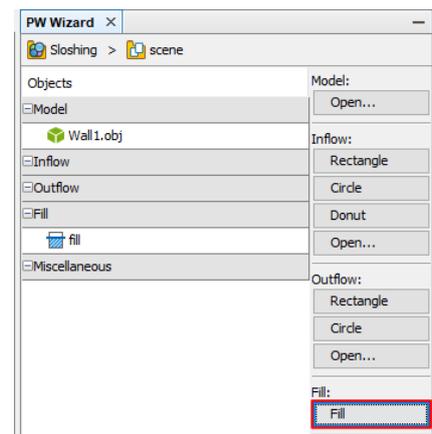
1. **Projects** 대화상자에서 scene > Input 의 하위에 **domain** 을 더블 클릭합니다.
2. **domain** 의 기준 중심점을 다음과 같이 입력합니다.
 - Location: 0, 0.15, 0
3. **domain** 의 크기를 다음과 같이 입력합니다.
 - Dimensions: 0.75, 0.34, 0.22974



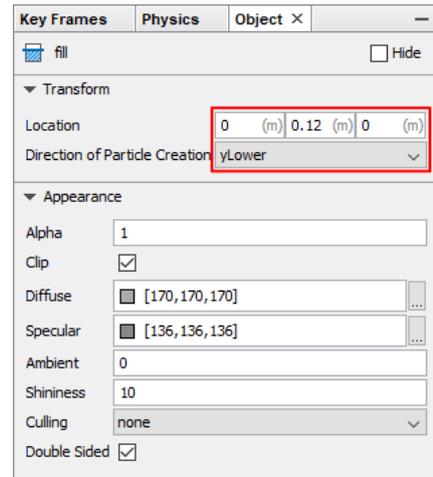
Fill 생성하기

Fill 은 정의된 평면과 **Wall1** 로 닫힌 공간에 입자를 채웁니다. 정의된 평면은 Domain 범위 안쪽으로 제한됩니다.

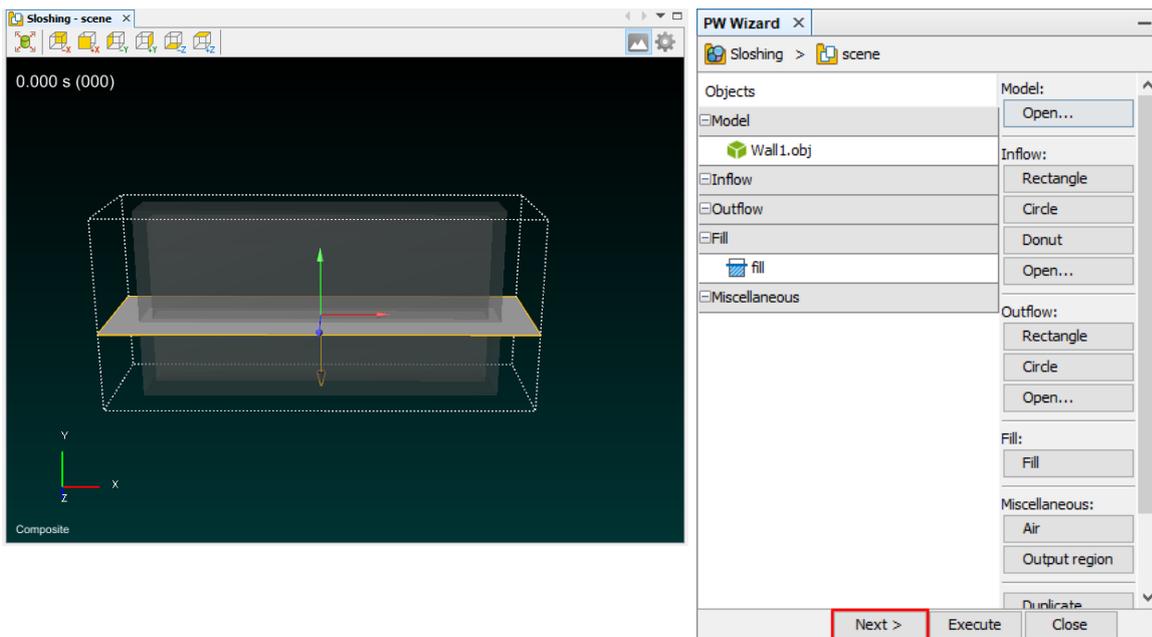
1. **PW Wizard** 대화상자에서 **Fill** 버튼을 클릭합니다.
Projects 대화상자에 scene > Input 에 **fill** 이 생성됩니다.



2. **Projects** 대화상자에서 생성된 **fill** 을 더블 클릭합니다.
3. **Object** 대화상자에서 옵션값을 아래와 같이 설정합니다.
 - **Location: 0, 0.12, 0**
 - **Direction of Particle Creation: yLower**

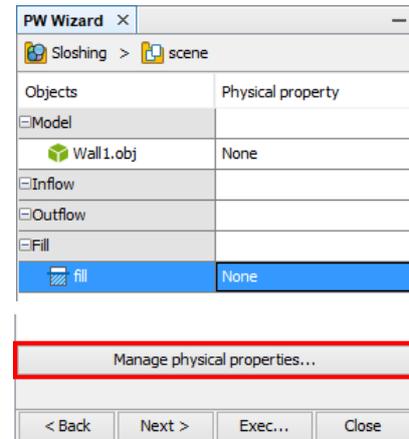


4. **Fill** 이 아래 그림과 같이 정의되었는지 확인한 후 **PW Wizard** 대화상자에서 **Next** 를 클릭하여 다음 페이지로 넘어갑니다.



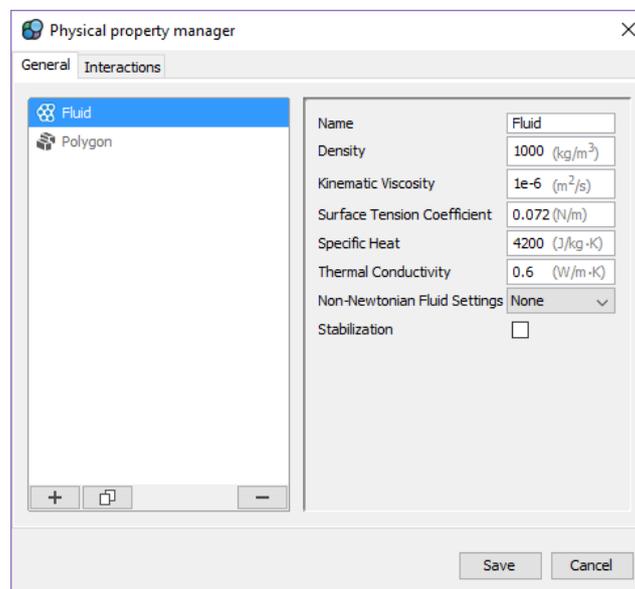
물성 생성 및 설정하기

1. 물성을 생성하기 위해 **PW Wizard** 대화상자 하단에 위치한 **Manage physical properties...** 버튼을 클릭합니다.



Physical property manager 대화상자가 나타납니다.

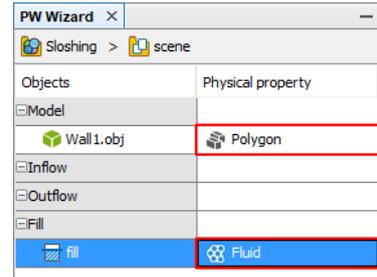
2. **+** 버튼을 클릭하여 **Fluid** 를 생성합니다.
생성된 **Fluid** 의 기본 물성값은 물이기 때문에 그대로 사용합니다.
3. 다시 **+** 버튼을 클릭하여 **Polygon** 를 생성합니다.
Polygon 은 **RecurDyn** 에서 Wall 로 정의한 강체를 지정하는 물성입니다.



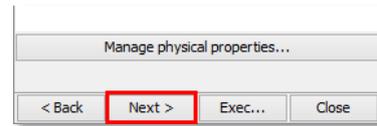
4. **Save** 를 클릭하여 대화상자를 닫습니다.

5. **PW Wizard** 대화상자에서 **Physical property** 를 None 에서 아래와 같은 값으로 변경합니다.

- **Wall1.obj: Polygon**
- **Fill: Fluid**



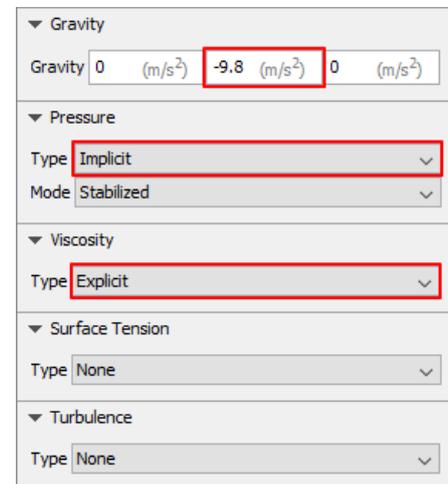
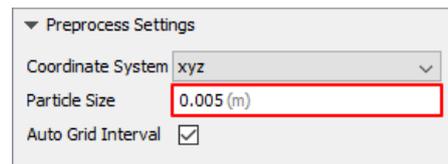
6. **PW Wizard** 대화상자의 하단에 위치한 **Next** 를 눌러 다음 페이지로 넘어갑니다.



입자 및 환경 설정하기

PW Wizard 대화상자에서 환경 옵션들을 변경합니다.

1. **Particle Size** 입력란에 **0.005** 를 입력합니다.
2. **Next** 를 클릭하여 다음 페이지로 넘어갑니다.
3. **Gravity** 의 **Y** 입력란에 **RecurDyn** 과 동일하게 **-9.8** 을 입력합니다.
4. **Pressure** 의 옵션을 아래와 같이 입력합니다.
 - **Type: Implicit**
5. **Viscosity** 를 **Explicit** 으로 선택합니다.
6. **Next** 를 클릭하여 다음 페이지로 넘어갑니다.
7. **Thermal** 페이지에서는 옵션의 변경없이 **Next** 를 눌러 넘어갑니다.

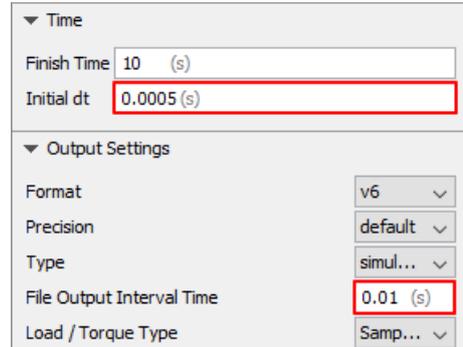


해석 조건 설정하기

PW Wizard 대화상자에서 해석 옵션들을 변경합니다.

1. Time 옵션에서 **Initial dt[s]** 입력란에 **0.0005** 를 입력합니다.

위 옵션값은 해석 중 초기 스텝 사이즈와 최대 스텝 사이즈를 의미하며 **RecurDyn** 에서 **Maximum Time Step** 과 **Initial Time Step** 과 같은 역할을 합니다.



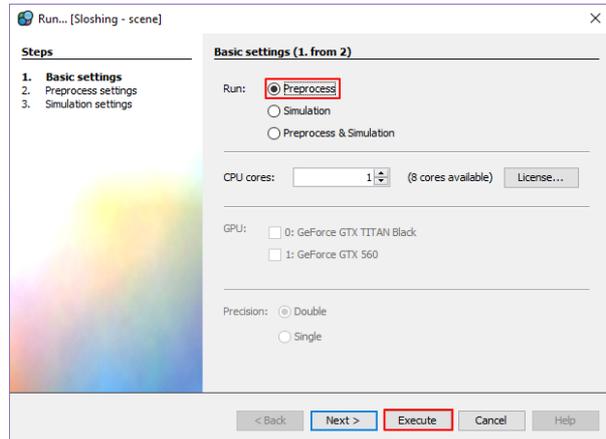
2. **File Output Interval Time[s]** 입력란에 **0.01** 을 입력합니다.

위 옵션값은 각 스텝 간의 시간[초]을 의미하며 **RecurDyn** 과 비교하면 **EndTime/Step** 값과 일치하도록 합니다.

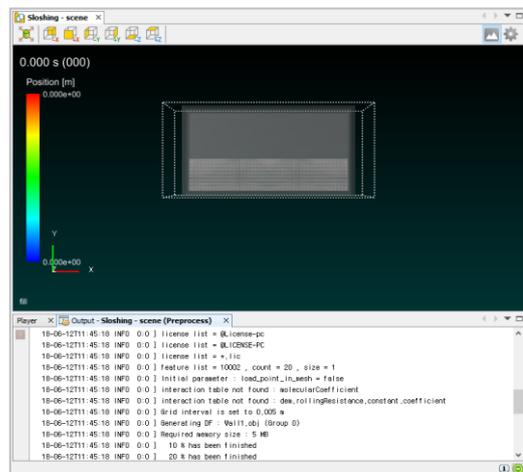
입자 생성하기

1. **PW Wizard** 대화상자에서 모든 설정을 마쳤다면 **Execute** 버튼을 클릭합니다.
2. **Run** 대화상자가 나타납니다.
3. **Execute** 버튼을 클릭합니다.

오른쪽 그림과 같이 **Output** 대화상자에 입자 생성이 완료되었다는 메시지와 함께 **Wall1** 속에 유체 입자가 생성됩니다.



프로젝트(<ProjectLocation>/Sloshing/scene)에 있는 **pre** 와 **df** 폴더 안에 Co-simulation 할 때 필요한 파일이 생성됩니다.



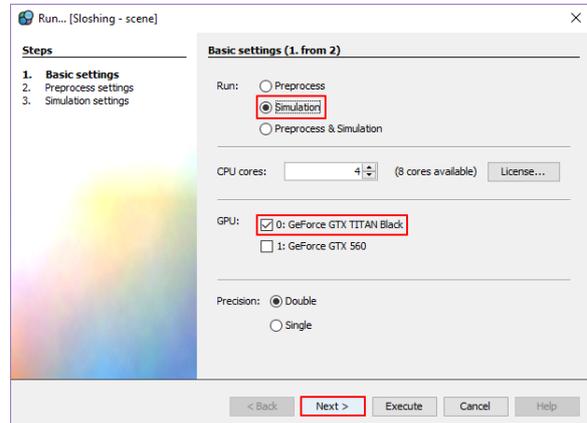
Co-simulation 준비하기

RecurDyn 에서 Co-simulation 을 하기 위해서는 몇 가지 파일을 **Particleworks** 에서 생성을 해줘야 합니다. 관련 파일들은 **Particleworks** 에서 단독해석을 진행하면 자동으로 생성해줍니다.

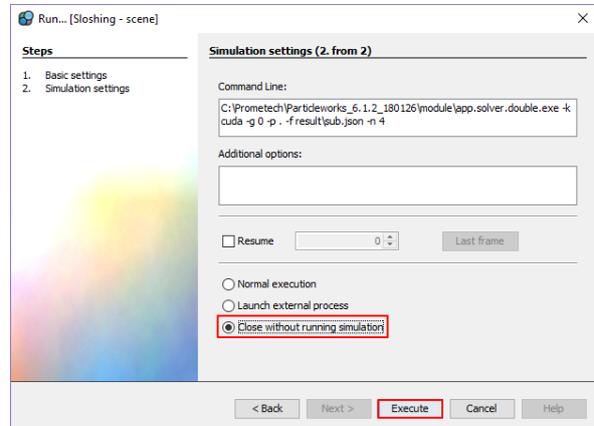
Particleworks 단독 해석하기



1. **Simulation** 탭의 **Run** 을 클릭합니다.
Run 대화상자가 나타납니다.
2. **Run** 옵션을 **Simulation** 으로 선택합니다.
3. 해석에 사용될 **CPU core** 개수를 입력합니다.
GPU 가 있다면 해석에 사용할 디바이스를 선택합니다.
4. **Next** 를 클릭합니다.



5. **Close without running simulation** 을 클릭합니다.
6. **Execute** 를 클릭합니다.



프로젝트 (<ProjectLocation>/Sloshing/scene) 에 있는 **result** 폴더 안에 Co-simulation 할 때 필요한 파일이 생성됩니다.

Co-simulation 하기 위한 준비를 모두 마쳤습니다.

7. 프로젝트를 저장합니다.

5장 진행 시 **Particleworks** 프로그램은 꺼져있어도 됩니다. 그러나 본 교재에서는 해석결과를 해석 중에 실시간으로 확인하기 위해 프로그램을 켜둔 채로 다음 장을 진행합니다.

Chapter

5

Co-simulation

본 장에서는 **RecurDyn** 과 **Particleworks** 를 사용하여 강체와 입자간의 거동을 해석하기 위한 Co-simulation 을 수행합니다.

목적

본 장에서는 RecurDyn 에서 Co-simulation 을 수행하는 방법을 배우게 됩니다.



예상 소요 시간

120 분

Co-simulation

RecurDyn 에서 **Co-simulation** 진행하기

1. **RecurDyn** 을 실행하여 4 장에서 복사한 **Sloshing.rdyn** 파일을 엽니다.
(파일 경로: <ProjectLocation>/Sloshing/scene/Sloshing.rdyn)



2. **External SPI** 탭의 **Particleworks** 그룹에서 **Connect** 를 활성화합니다.



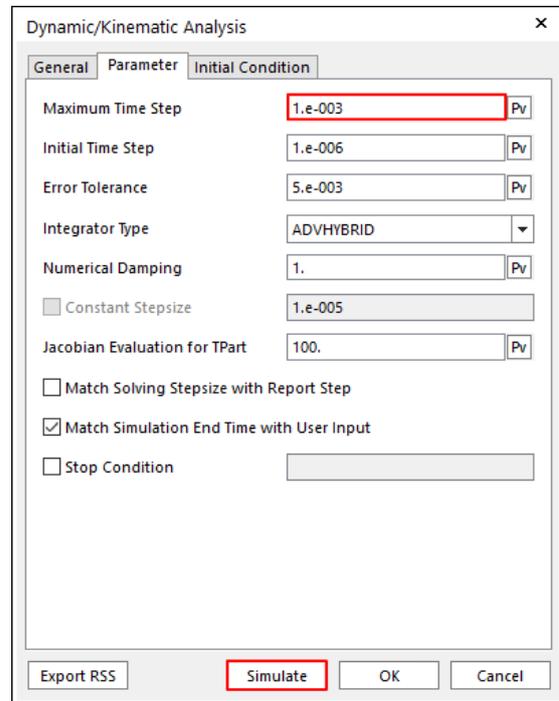
3. **Analysis** 탭의 **Simulation Type** 그룹에서 **Dyn/Kin** 을 클릭합니다.

4. **Parameter** 탭에서 **Maximum Time Step** 을 **1.e-003** 으로 설정합니다.

5. **Simulate** 버튼을 클릭합니다.

Particleworks 와 **RecurDyn** 이 Co-simulation 을 진행합니다.

(CPU 와 GPU 사양이 해석시간에 많은 영향을 미칩니다.)

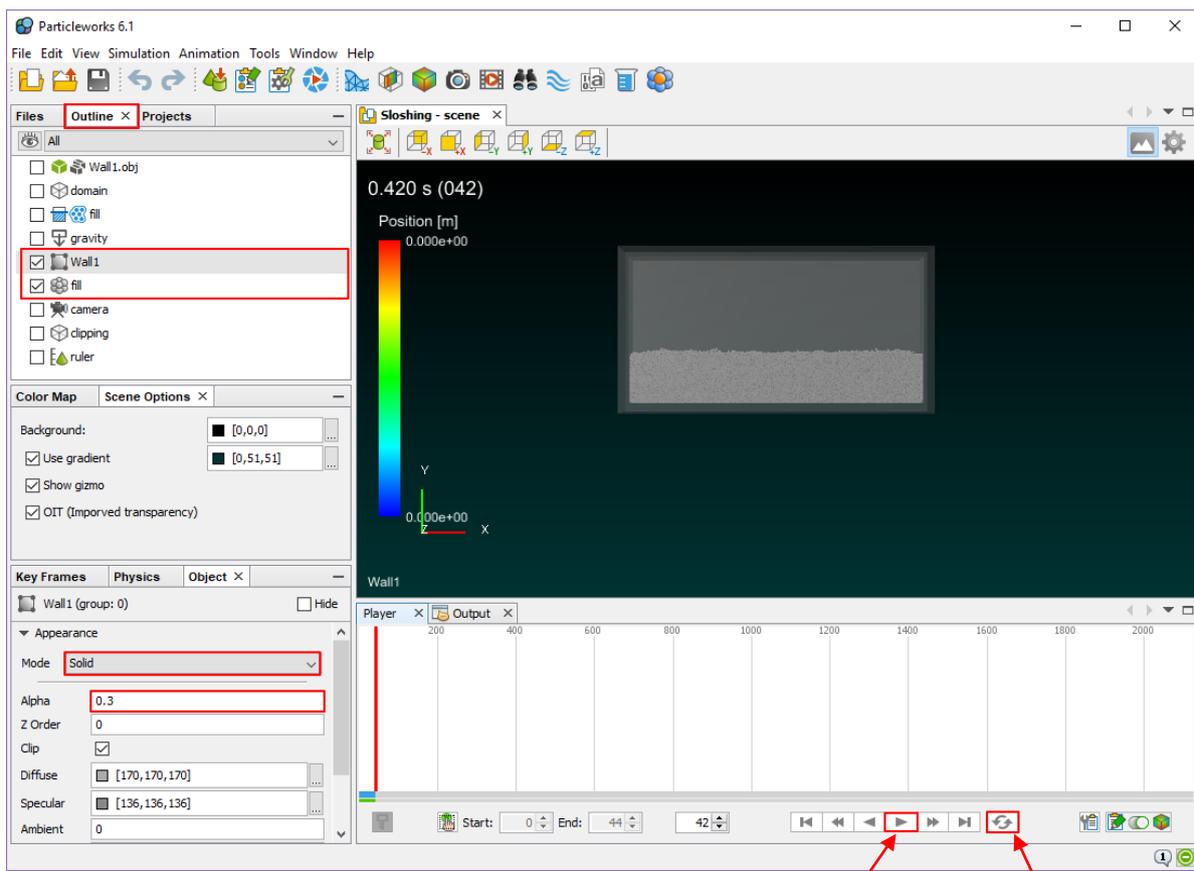


해석 진행상황 확인하기

Particleworks 에서 해석 중 진행상황을 확인할 수 있습니다.

1. **Outline** 대화상자에서 **Wall1** 과 **fill** 만 보이도록 옵션을 선택합니다.
2. **Outline** 대화상자에서 **Wall1** 을 클릭합니다.
3. **Wall1** 의 **Object** 에서 옵션을 다음과 같이 입력합니다.
 - **Mode: Solid**
 - **Alpha: 0.3**
4. **Particleworks** 의 **Player** 대화상자에서 **Switches loop flag** 옵션을 끕니다.
Switches loop flag 옵션은 애니메이션의 무한반복을 정의하는 옵션입니다.
5. 애니메이션 **Play forward** 버튼을 클릭합니다.

현재 해석이 완료된 스텝까지 애니메이션을 보여줍니다.



Play forward Switches loop flag

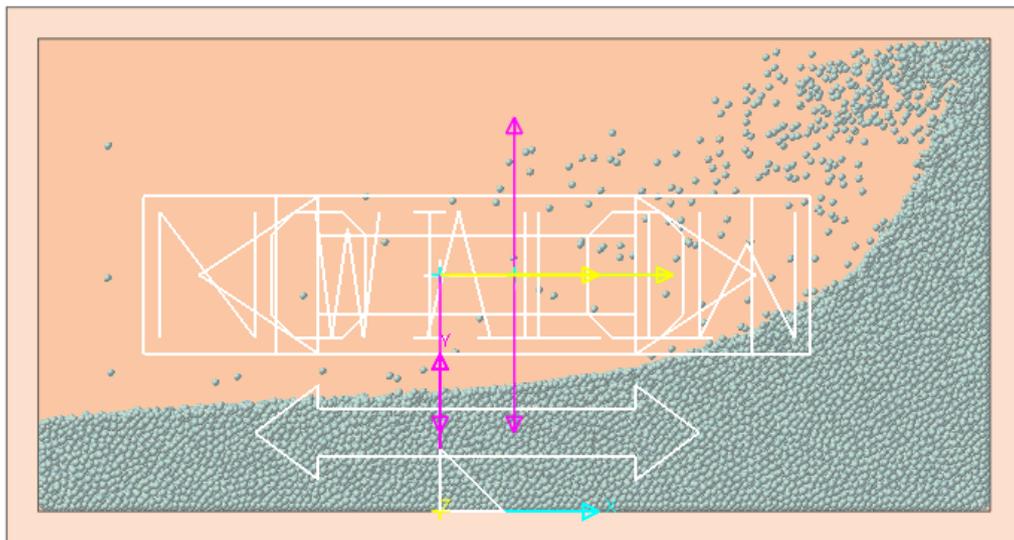
RecurDyn Animation 보기

Animation 재생하기

- **Analysis** 탭의 **Animation Control** 그룹에서 **Play/Pause** 를 클릭합니다.

Wall 이 이동하면 내부에 생성된 입자들이 Wall 내벽과의 충돌로 인해 반력이 발생하고 입자의 거동이 발생합니다. Wall 이 움직이는 초기 구간에서는 입자의 주기형상이 일정하지 않지만, 주기가 몇 번 반복되면서 입자들이 일정한 주기형상으로 거동하는 것을 확인할 수 있습니다.

Sloshing
Time = 10,20000000 Second

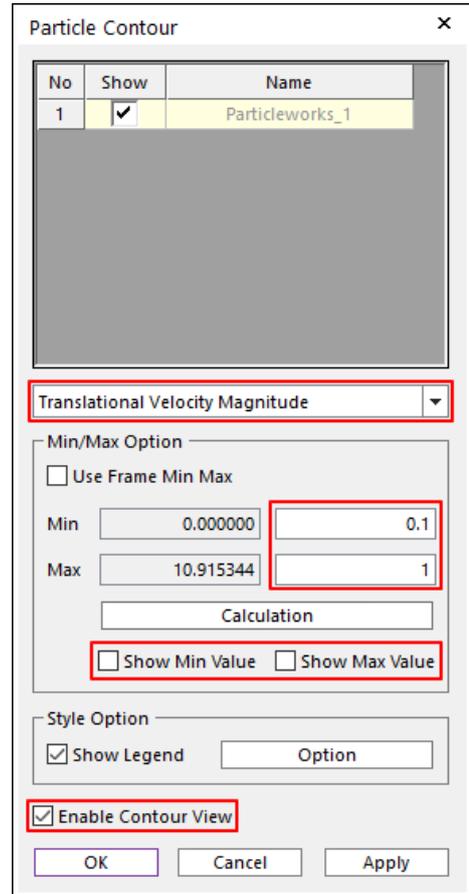


RecurDyn 에서 Particle Contour 보기

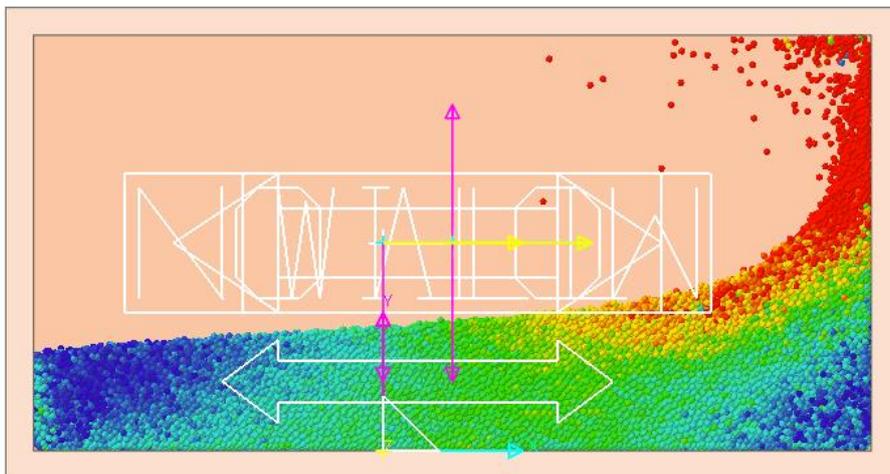
해석된 물리량에 따라 입자들에 대한 Display 를 변경할 수 있습니다.



1. **External SPI** 탭의 **Post-Process** 그룹에서 **Particle Contour** 를 클릭합니다.
2. **Contour** 대화상자가 나타나면 **Contour Type** 을 **Translational Velocity Magnitude** 로 변경합니다.
3. **Min/Max Option** 에서 값을 아래와 같이 변경합니다.
 - **Min: 0.1**
 - **Max: 1**
4. **Show Min Value** 와 **Show Max Value** 를 끕니다.
5. **Enable Contour View** 를 선택하고 **OK** 를 눌러 대화상자를 닫습니다.



속도에 대한 Contour 를 보도록 설정하였습니다. 아래 그림과 같이 거동의 변화가 큰 부분에서 입자의 속도가 가장 빠르게 나타납니다.



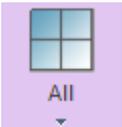
Plot 보기

유체를 일정한 주기로 슬로싱하기 위해 필요한 힘을 확인합니다.

Driving Torque 보기



1. **Analysis** 탭의 **Plot** 그룹에서 **Result** 를 클릭합니다.



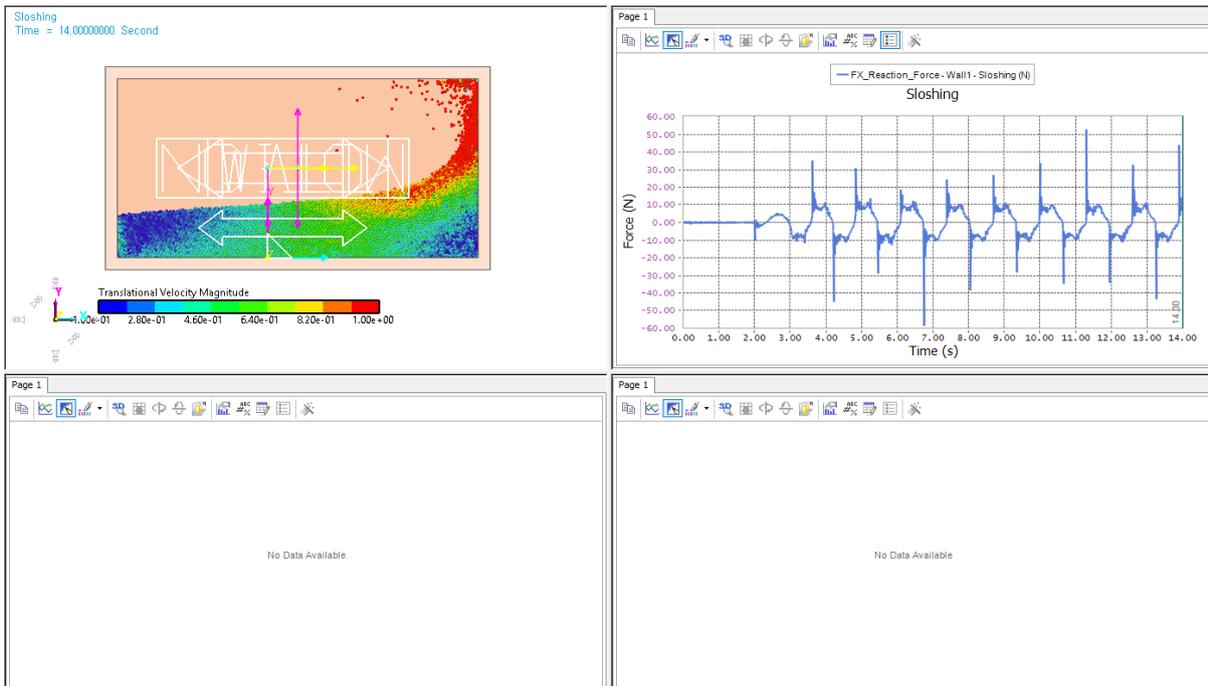
2. **Home** 탭의 **View** 그룹에서 **Show All Windows** 를 클릭합니다.



3. 상단 왼쪽 윈도우에 **Tool** 탭의 **Animation** 그룹에서 **Load Animation** 을 클릭합니다.

4. 상단 오른쪽 윈도우에 **Wall1** 의 **FX_Reaction_Force** 의 Plot 을 그립니다.

아래의 그림은 유체의 슬로싱 현상을 입자의 거동으로 인한 일정주기의 반력 그래프로 보여주고 있습니다.



Chapter

6

Particleworks Postprocessing

본 장에서는 **Particleworks** 에서 제공하는 Post 기능을 사용하여 유체 압력을 측정하고, 유체의 거동에 대한 Animation 을 생성합니다.

목적

본 장에서는 해석된 입자들의 물리량을 측정하는 방법과 입자를 실제 유체처럼 표현하는 방법에 대해 배우게 됩니다.



예상 소요 시간

30 분

Particleworks Animation 보기

Particleworks 에서도 해석한 결과에 대한 Animation 을 볼 수 있습니다.

Animation 재생하기

- **Play** 버튼을 클릭하여 **Animation** 을 봅니다.



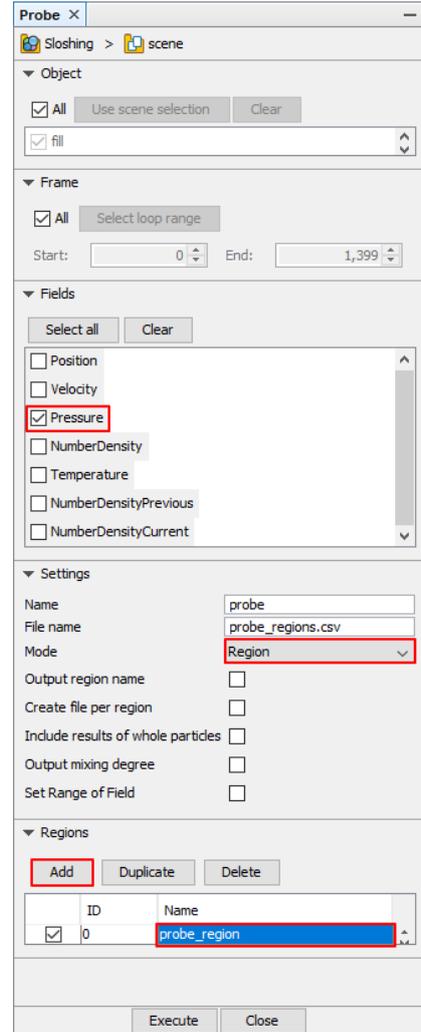
Probe 생성하기



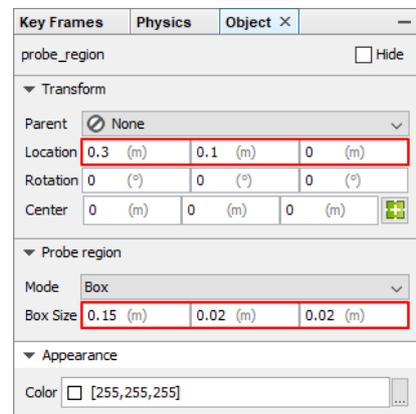
입자들에 대한 정확한 수치정보를 얻기 위해 Probe 를 생성합니다.

1. **Tools** 탭에서 **Probe** 를 클릭합니다.
우측에 **Probe** 대화상자가 나타납니다.
2. **Fields** 에서 **Pressure** 를 선택합니다.
3. **Settings** 에서 **Mode** 를 **Region** 으로 선택합니다.
4. **Regions** 에서 **Add** 버튼을 클릭합니다.
5. 생성된 ID **0** 의 **probe_region** 을 클릭합니다.

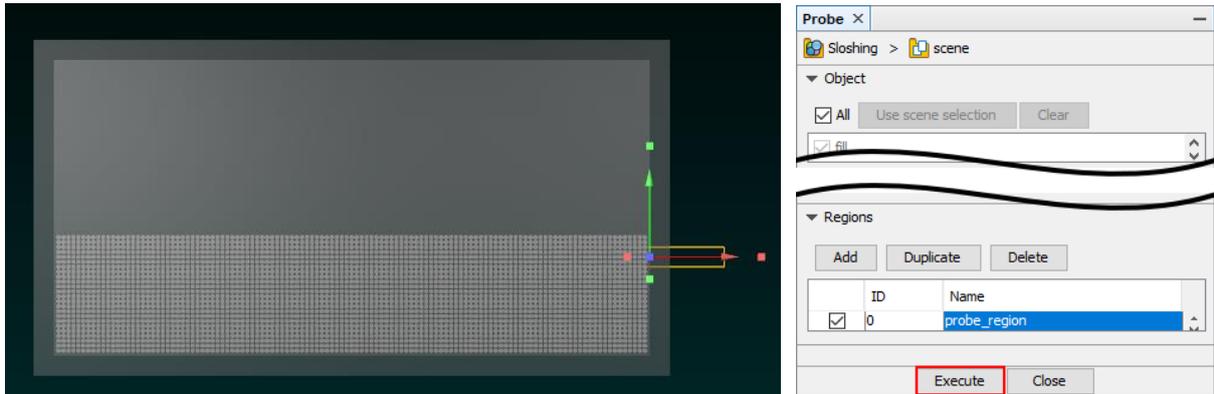
probe_region 에 대한 **Object** 대화상자가 왼쪽에 나타납니다.



6. **Object** 대화상자의 **Transform** 에서 아래 옵션을 변경합니다.
 - **Location: 0.3, 0.1, 0**
7. **Object** 대화상자의 **Probe region** 에서 아래 옵션을 변경합니다.
 - **Box Size: 0.15, 0.02, 0.02**



Wall 의 오른쪽 벽에 유압을 측정하기 위해 움직이는 범위에 Probe 를 생성하였습니다.



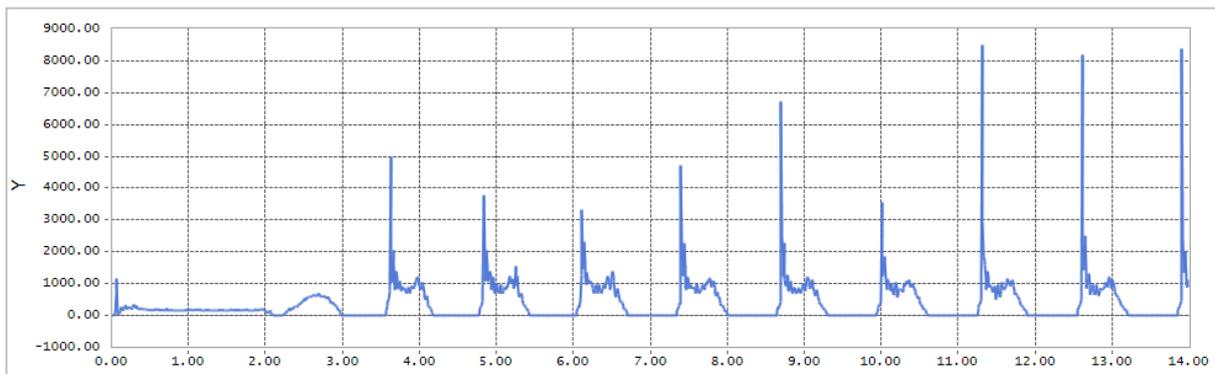
8. **Execute** 버튼을 클릭합니다.

Probe 결과가 CSV 파일로 생성됩니다. 생성이 완료되면 파일이 저장된 위치의 폴더가 나타납니다.

(폴더 경로: <ProjectLocation>/Slushing/scene/prove)

생성된 CSV 결과 파일을 열어 아래 데이터를 추출하여 그려보면 다음과 같은 결과가 나타납니다.

- **X : SimulationTime**
- **Y : Pressure_max**



Surface 생성하기

Particleworks 에서는 유체의 거동을 실제와 같이 매끄러운 표면으로 표현할 수 있습니다.

Surface 생성하기



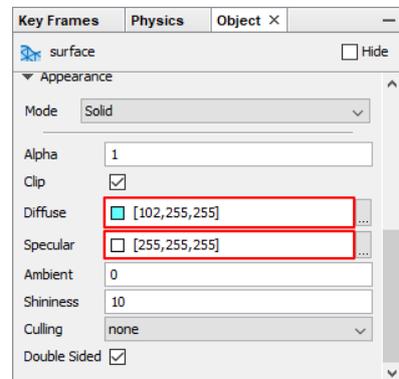
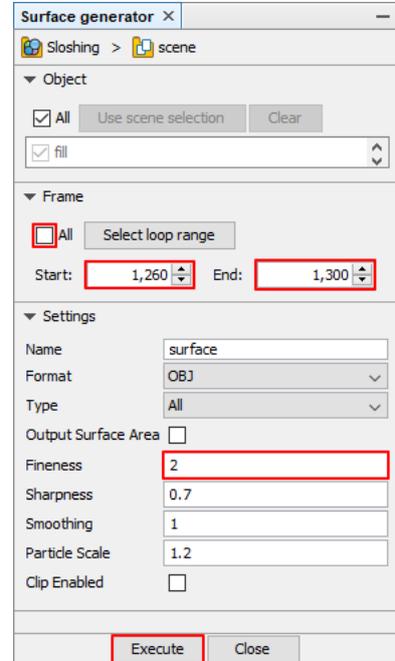
1. **Tools** 탭에서 **Surface generator** 를 클릭합니다.
우측에 **Surface generator** 대화상자가 나타납니다.

2. **Frame** 을 정의하고, 관련 옵션값을 설정합니다.
 - **Start Frame: 1260**
 - **End Frame: 1300**
 - **Fineness: 2**

3. **Execute** 를 클릭합니다.
Output 대화상자에서 진행상황을 확인할 수 있습니다.

4. 생성이 완료되면 **Projects** 대화상자에서 scene > Post 하위에 **surface** 를 더블클릭 합니다.

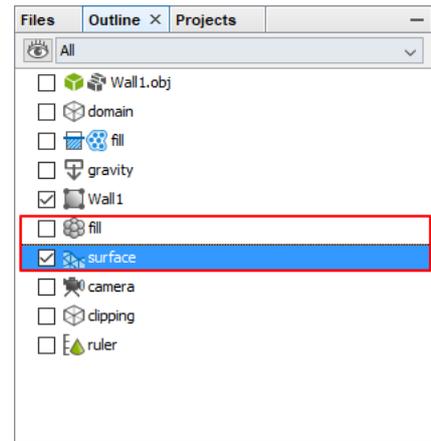
5. Color 와 관련된 아래 옵션을 다음과 같이 변경합니다.
 - **Diffuse: 102, 255, 255**
 - **Specular: 255, 255, 255**



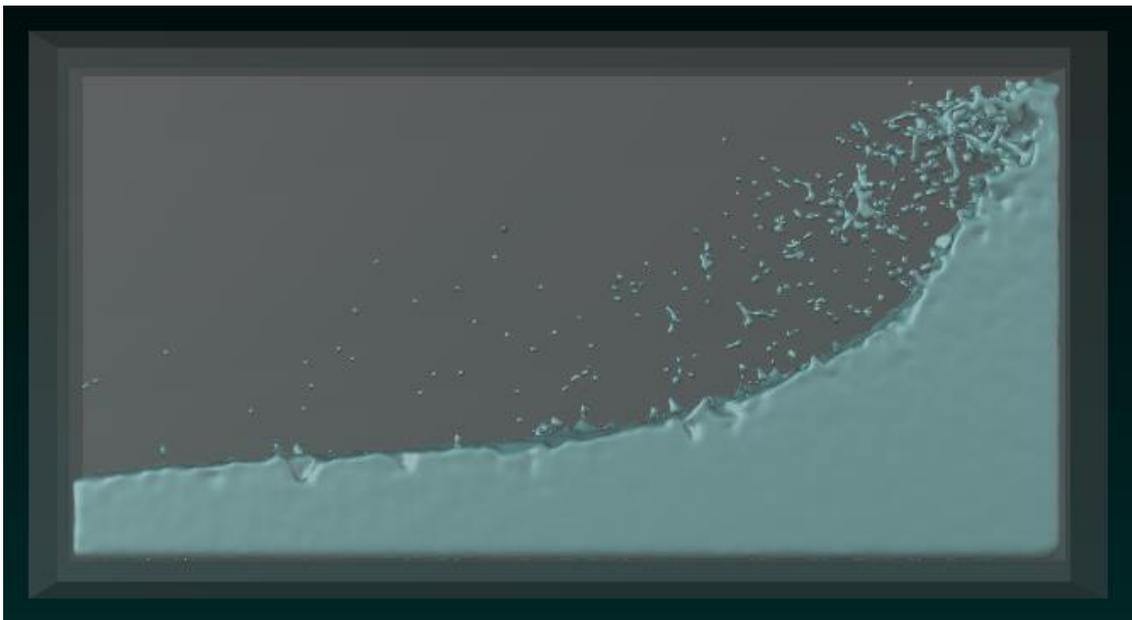
입자 **Animation** 숨기기

Surface 가 정상적으로 생성되면 기존에 존재하는 입자 Animation 을 숨겨야 합니다.

- Outline 대화상자에서 fill 을 숨기고 Surface 만 보이도록 합니다.



step1260 에서 step1300 사이의 Animation 을 Play 해보면 아래와 같은 결과를 볼 수 있습니다.



Surface 를 생성하여 보다 실제적인 유체에 가깝게 결과를 보여줄 수 있습니다. 이 기능을 이용하여 생성된 이미지 및 동영상을 통해 보다 설득력 있는 프레젠테이션 제작 및 보고서 작성이 가능합니다.

Chapter

7

결과 분석 및 검토

목적

본 장에서는 논문에서 실험한 결과값과 RecurDyn 과 Particleworks 의 Co-simulation 을 통해 해석된 결과값을 비교 분석합니다.



예상 소요 시간

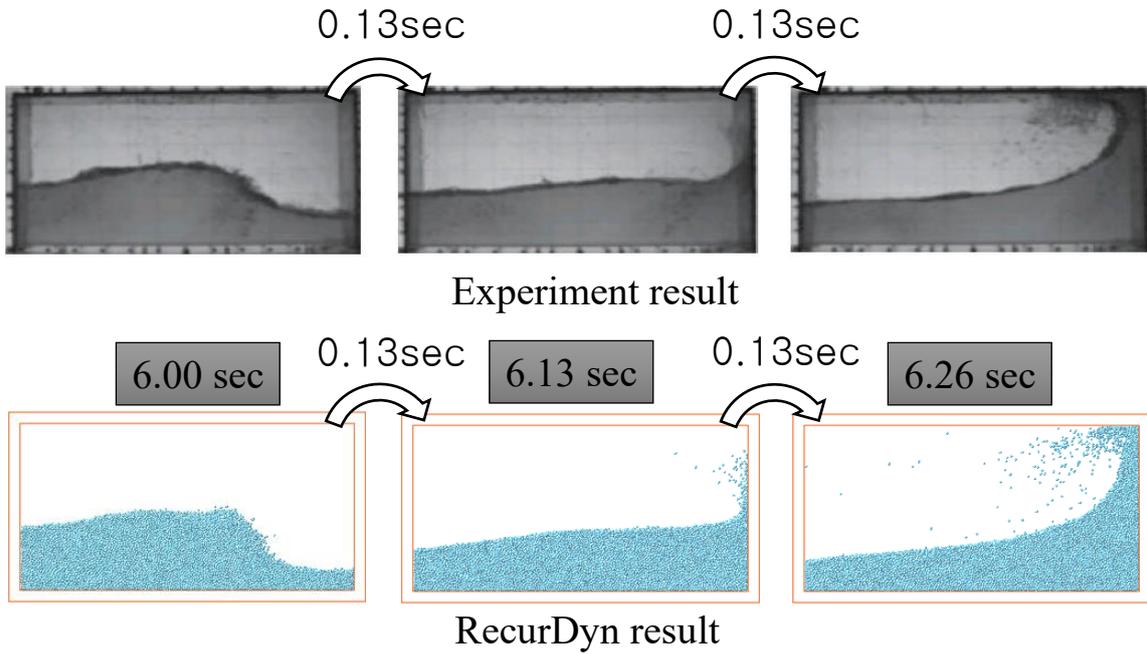
5 분

결과 비교 분석하기

참조한 논문의 결과와 본 교재의 진행을 통해 나온 결과를 비교 분석하여 MPS 해석 방법에 대한 신뢰도를 판단합니다.

유체 거동 결과 비교 분석:

아래 그림은 0.13 초 간격으로 유체거동에 대한 프로파일을 나타내고 있습니다. 그림에서 알 수 있듯이 왼쪽에서 생성된 유체의 파형이 오른쪽으로 진행하다가 벽에 부딪혀 부서집니다. 해석을 통해 얻은 결과에서도 실험의 프로파일과 동일하게 우측으로 진행된 파형이 우측 벽에 부딪혀

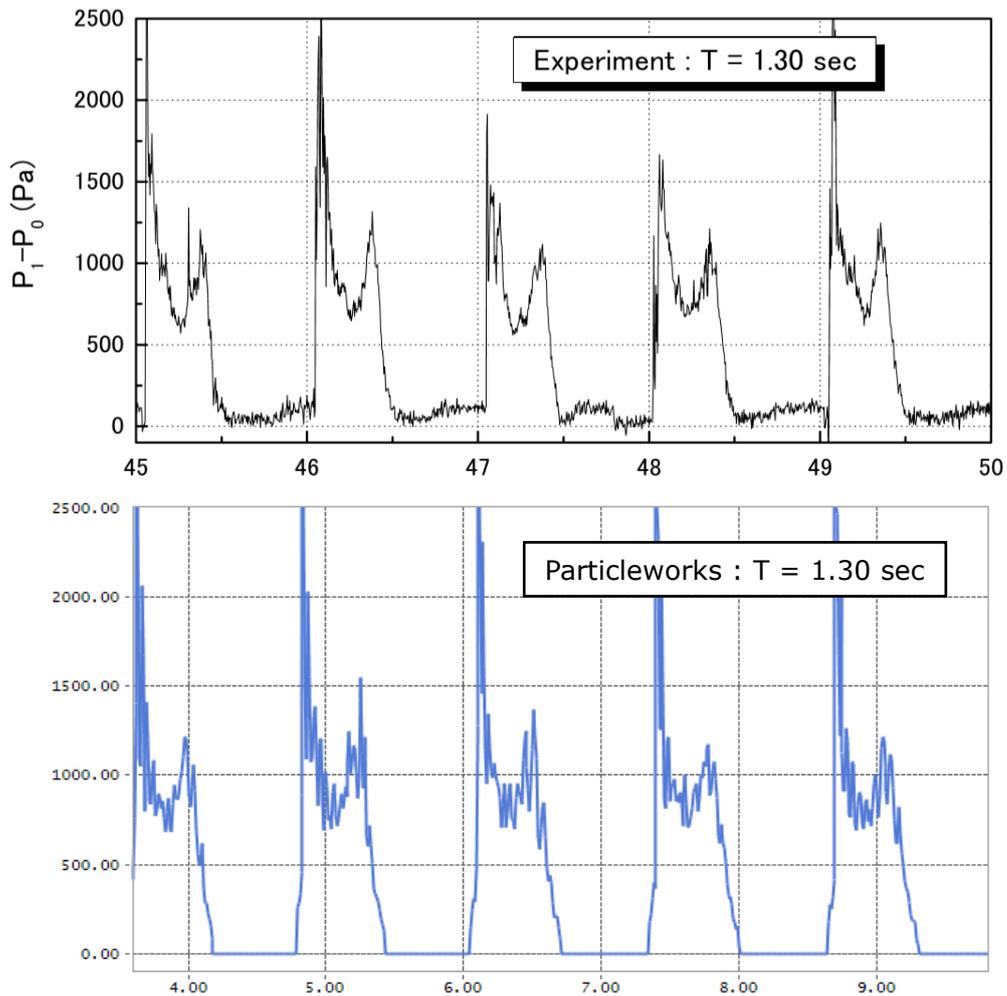


부서지는 것을 확인할 수 있습니다.

유체 압력 결과 비교 분석:

아래 그림은 시간에 대한 압력 그래프로, 실험에서 추출한 데이터와 본 교재 6 장의 해석을 통해 얻은 데이터를 동일한 좌표계에서 비교하여 보여줍니다. 실험의 압력 데이터는 본 교재와 동일하게 바닥으로부터 10cm 높이에서 측정된 결과값입니다.

두 그래프를 비교하여 분석해보면, 유사한 경향으로 1.3 초의 주기운동을 하며 유체가 벽면에 가하는 압력 크기 또한 매우 유사함을 알 수 있습니다.



Thanks for participating in this tutorial