



OpenFOAM 첫 걸음

신재렬

(jrshin@nextfoam.co.kr)

사용자 질의 응답

(http://www.nextfoam.co.kr/sub/forum_list.php)



목 차

- OpenFOAM 첫 걸음 목표
- OpenFOAM 소개
 - OpenFOAM 이란 무엇인가?
 - 방정식을 어떻게 적용하는가?
 - 유용한 도움말 및 설명서가 있는가?
- OpenFOAM 설치
 - Ubuntu 12.04 LTS 설치
 - Terminal에서 OpenFOAM 2.3.0 설치
 - SynapticPackManager에서 설치
- OpenFOAM으로 하는 첫 유동 해석
 - OpenFOAM의 일반적인 구조
 - 예제 1. Heat Transfer
 - 예제 2. Driven Cavity Flow
 - 예제 3. Poiseuille Flow
 - 예제 4. Bubble Rising (VOF)
- OpenFOAM에 방정식 추가 적용
 - Application의 일반적인 구조
 - 예제 5. icoFoam에 열 전달 방정식 추가
 - 예제 6. 열 전달이 포함된 Driven Cavity

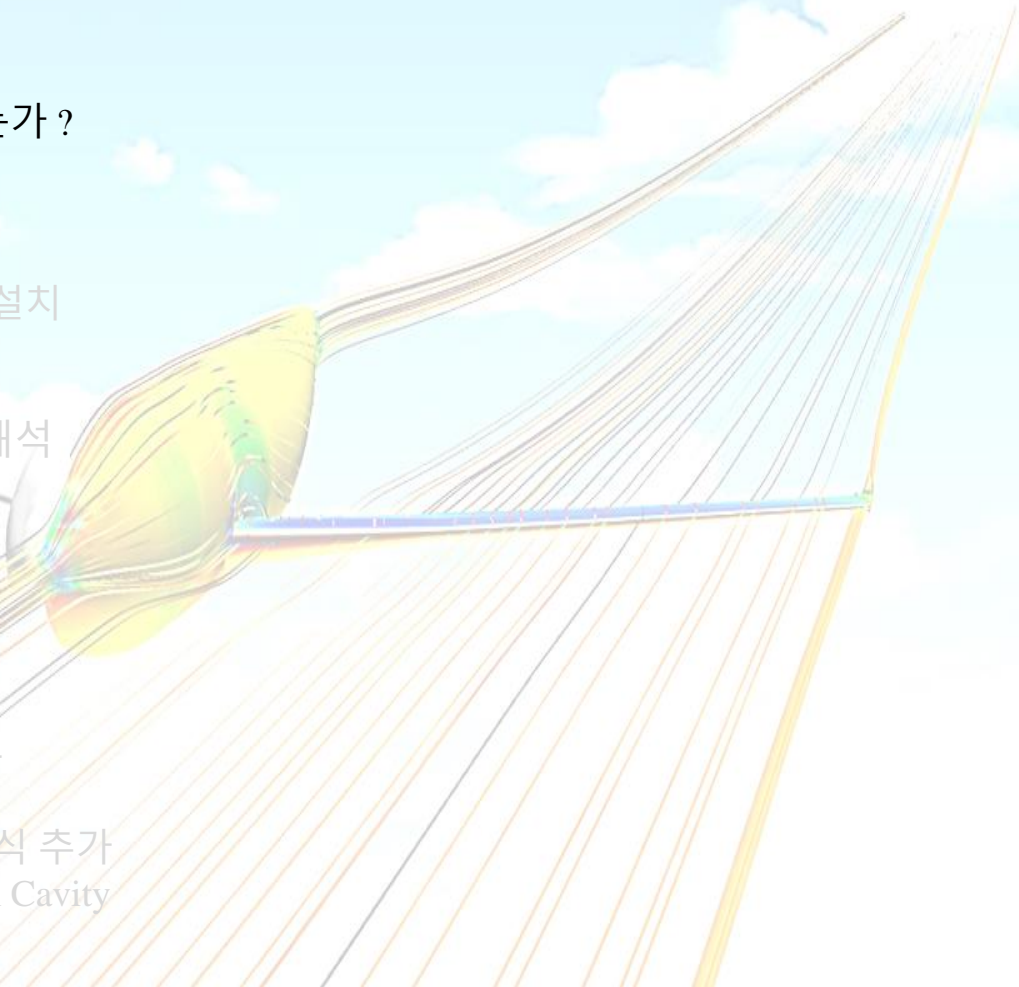




OpenFOAM 첫 걸음 목표

- OpenFOAM 기능 이해
- 도움 및 참조를 찾는 방법
- Tutorial의 실행 및 후처리 과정 이해
- 자신의 해석 문제와 유사한 Tutorial을 실행 및 이해
- 자신의 해석 문제에 가장 적합한 해석 Solver 선택
- 기존 Tutorial을 수정하여 자신의 해석 문제에 맞게 적용
- 다음 수준으로 지속적인 학습 → 벤처로 창업 ?

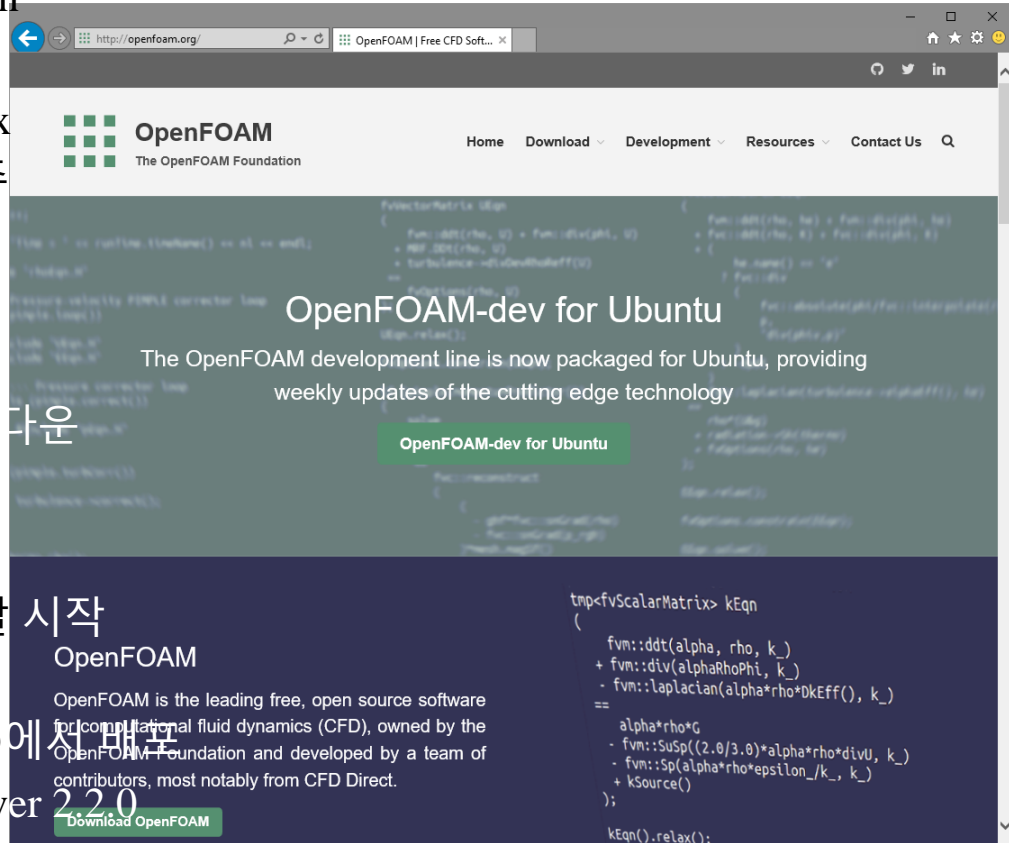
- OpenFOAM 첫 걸음 목표
- OpenFOAM 소개
 - OpenFOAM이란 무엇인가?
 - 방정식을 어떻게 적용하는가?
 - 유용한 도움말 및 설명서가 있는가?
- OpenFOAM 설치
 - Ubuntu 12.04 LTS 설치
 - Terminal에서 OpenFOAM 2.3.0 설치
 - SynapticPackManager에서 설치
- OpenFOAM으로 하는 첫 유동 해석
 - OpenFOAM의 일반적인 구조
 - 예제 1. Heat Transfer
 - 예제 2. Driven Cavity Flow
 - 예제 3. Poiseuille Flow
 - 예제 4. Bubble Rising (VOF)
- OpenFOAM에 방정식 추가 적용
 - Application의 일반적인 구조
 - 예제 5. iceFoam에 열 전달 방정식 추가
 - 예제 6. 열 전달이 포함된 Driven Cavity





OpenFOAM 소개

- OpenFOAM이란 무엇인가?
 - **Open Field Operation and Manipulation**
 - 유한 체적법으로 편미분방정식 해석
 - C++로 작성된 오픈 소스 CFD toolbox
 - 다 물리학 코드로 주로 유체역학 위주
 - 기본적으로 3차원 형상을 다룸
 - 대규모 병렬계산 지원
 - 다양한 OS에 설치 (Linux가 바람직)
 - <http://www.openfoam.org>에서 무료로 다운
- 개발 역사
 - 1989: 영국 임페리얼 칼리지에서 개발 시작
 - 1996: FOAM 개발
 - 2004: GPL로 OpenFOAM을 OpenCFD에서 배포
 - 2013: OpenCFD는 ESI group로 편입, ver 2.2.0
 - 2016: Version 4.0 배포





OpenFOAM 소개

• OpenFOAM의 구조

OpenFOAM 은 실행 가능한 200 여 개의 프로그램 집합

전처리:

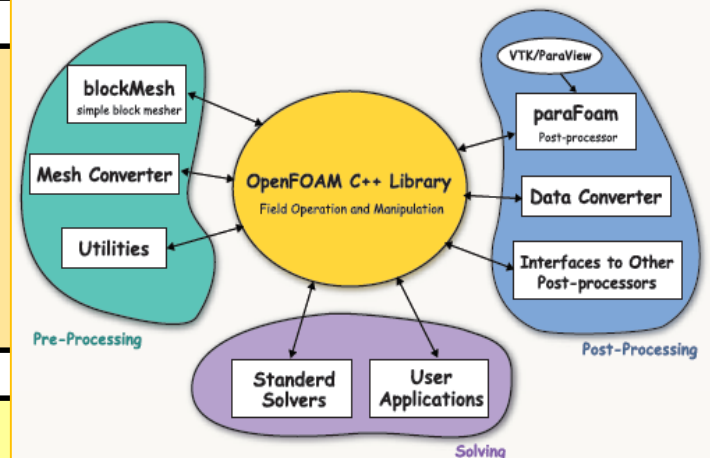
- 격자 (blockMesh, snappyHexMesh)
- 격자변환 (Ansys, Salome, ideas, Fluent case, CFX, Star-CD, Gambit, Gmsh 등)

솔버:

- 열전달
- 비압축성 / 압축성 유동
- 다상유동
- 연소, 전자기, 구조
- 난류 (RANS, LES, DNS)

후처리:

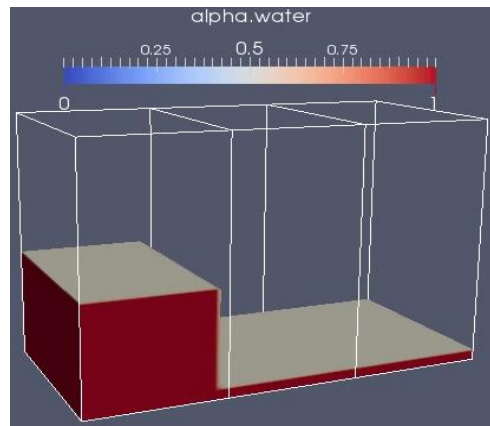
- 설치 시 함께 제공되는 ParaView (ParaFoam)
- 외부 후처리 프로그램 사용 (Fluent, Fieldview, Enight로 내보내기 및 Tecplot)
- 1D 또는 2D의 추출에 대한 "sample" 도구 (Gnuplot, Grace/xmogr 등)



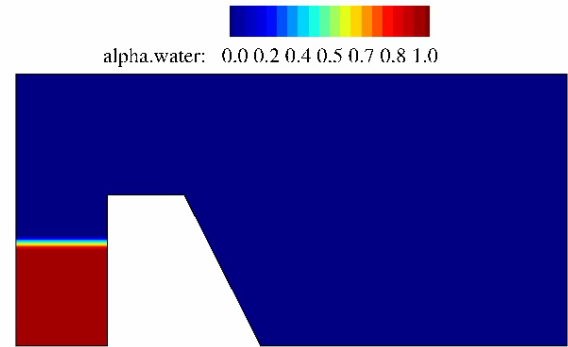


OpenFOAM 소개

- 적용예시



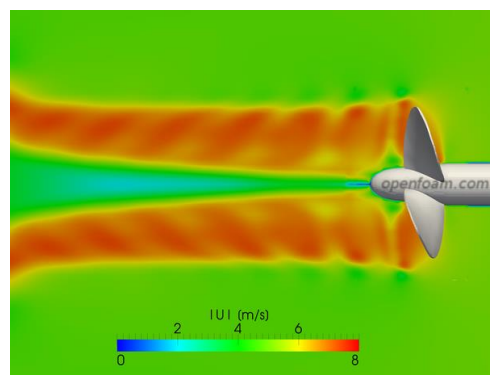
Dam Break Porous



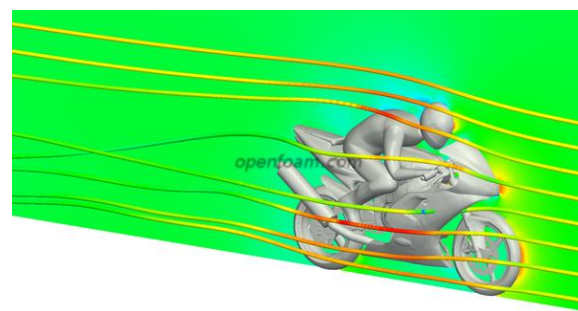
Weir over Flow



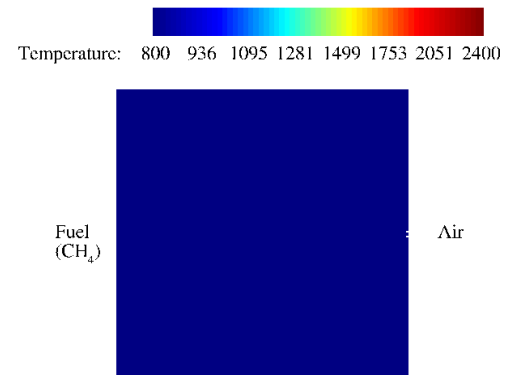
Moving Mesh



Ship Propeller



Motor Cycle



Counter Flow Flame



OpenFOAM 소개

- OpenFOAM에서 방정식 적용 ?
 - 운동량 방정식

$$\rho \frac{dU}{dt} + \text{div}(\rho U U) - \text{div}(\mu \nabla U) = \rho g - \nabla p$$

```

solve
(
    fvm::ddt(rho, U)
  + fvm::div(phi, U)
  - fvm::laplacian(mu, U)
  ==
  - fvc::grad(p)
);
  
```

객체	프로그램 표기	C++ 클래스
<ul style="list-style-type: none"> ▪ interpolation ▪ Differentiation ▪ Discretization 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Differencing schemes ▪ ddt, div, grad, curl ▪ ddt, d2dt2, div, laplacian 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ interpolation ▪ fvc, fec ▪ fvm, fem, fam

- 운동장은 스칼라, 벡터, 텐서로 나타낼 수 있음
- 시간 및 공간에 대한 이산화를 통해 해석 수행
- 수학기공식에 매우 근접하게 작성 할 수 있음



OpenFOAM 소개

- 유용한 도움말 및 설명서가 있는가?

- OpenFOAM 공식 가이드는 사용자와 프로그래머 가이드 (설치 폴더에 있음)
- Hrvoje Jasak 1996, Henrik Rusche 2001, 등의 논문
- Tutorial의 해석 결과 및 내용 참조
- 소스 코드에서 직접 확인 (코드에 주석이 거의 되어 있지 않음)
- ESI, Wikki에 돈을 지불하고 지원을 받는 방법

사용자 모임에 활동

- 포럼 (www.cfd-online.com/Forums/openfoam/)
- wiki (openfoamwiki.net)
- 워크샵 (www.openfoamworkshop.org)
- 개발자 주도 프로젝트 (www.extend-project.de)
- 한국 사용자 모임 (www.okuc.org/)



- OpenFOAM 첫 걸음 목표
- OpenFOAM 소개
 - OpenFOAM이란 무엇인가?
 - 방정식을 어떻게 적용하는가?
 - 유용한 도움말 및 설명서가 있는가?
- OpenFOAM 설치
 - Ubuntu 12.04 LTS 설치
 - Terminal에서 OpenFOAM 2.3.0 설치
 - SynapticPackManager에서 설치
- OpenFOAM으로 하는 첫 유동 해석
 - OpenFOAM의 일반적인 구조
 - 예제 1. Heat Transfer
 - 예제 2. Driven Cavity Flow
 - 예제 3. Poiseuille Flow
 - 예제 4. Bubble Rising (VOF)
- OpenFOAM에 방정식 추가 적용
 - Application의 일반적인 구조
 - 예제 5. icoFoam에 열 전달 방정식 추가
 - 예제 6. 열 전달이 포함된 Driven Cavity





OpenFOAM 소개

- 장점 및 단점 ?



- 무료 라이선스
- 소스에 대한 접근이 가능
- 정기적인 업데이트
- 많은 솔버를 내장 하고 있음
- 쉬운 방정식은 프로그래밍 가능
- 사용자 모임 (포럼, 컨퍼런스, 여름학교 등)

- 학습을 위한 시간 소모가 많음
- 문서가 없다
- GUI 개발 환경이 없다
- Linux 명령체계와 C++을 이해야 한다

OpenFOAM 설치

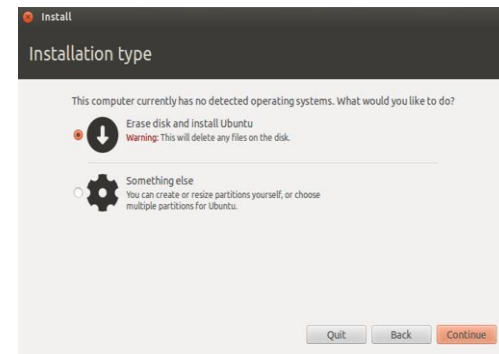
- Ubuntu 12.04 LTS 설치



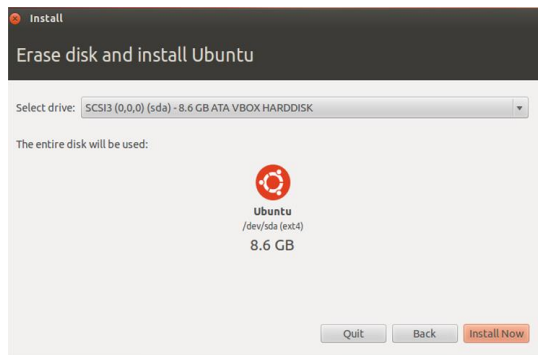
▪ 언어 선택 및 설치



▪ 설치 준비 중



▪ 지우고 다시 설치



▪ 설치 디스크 선택



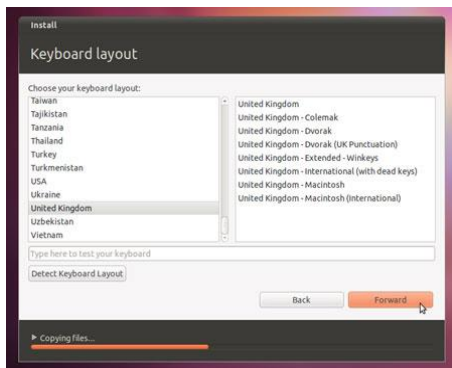
▪ 시간대 설정



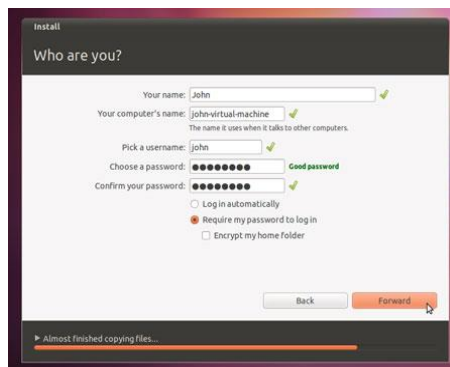


OpenFOAM 설치

• Ubuntu 12.04 LTS 설치



▪ 키보드 레이아웃 선택



▪ 사용자 등록



▪ 설치 완료

• 파일 매니저 (Nautilus)

– 폴더 및 파일 탐색

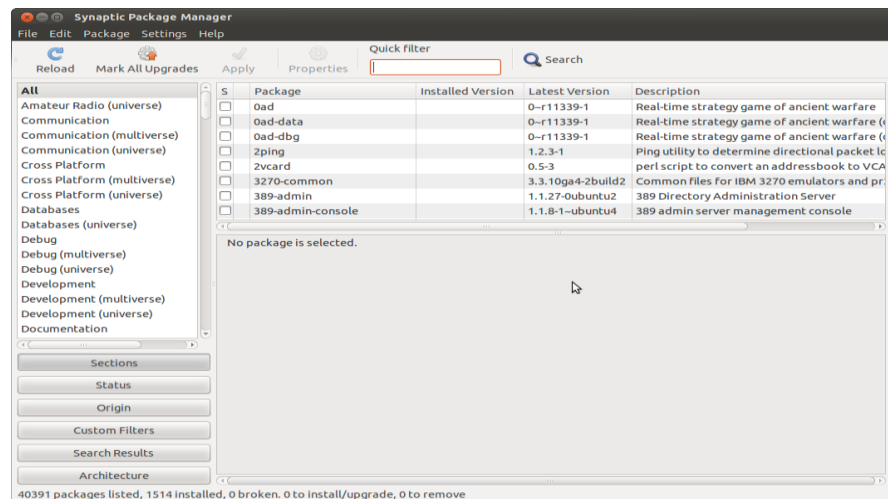
• 소프트웨어 설치 및 제거

– Ubuntu software center

– Synaptic Package Manager

• 소프트웨어 갱신

– Repositories

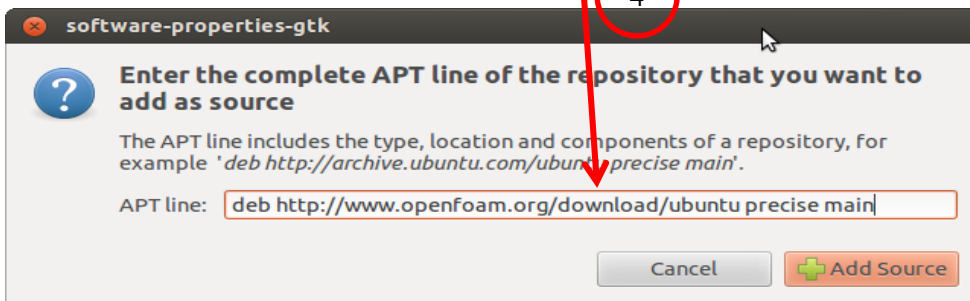
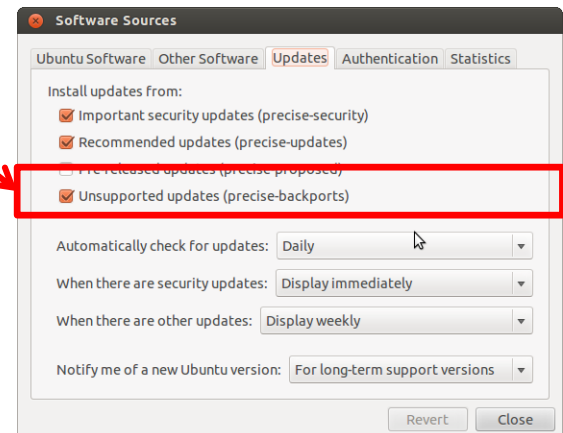
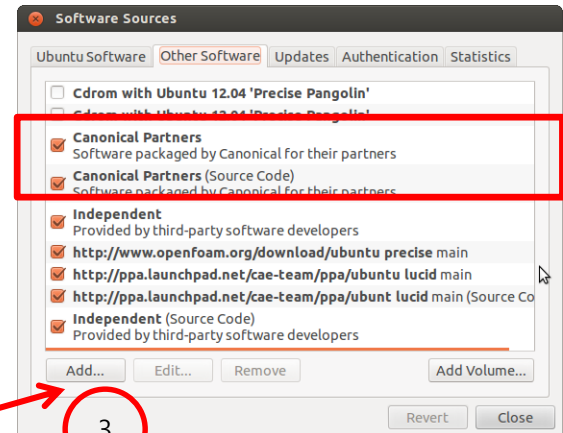


▪ Synaptic Package Manager



OpenFOAM 설치

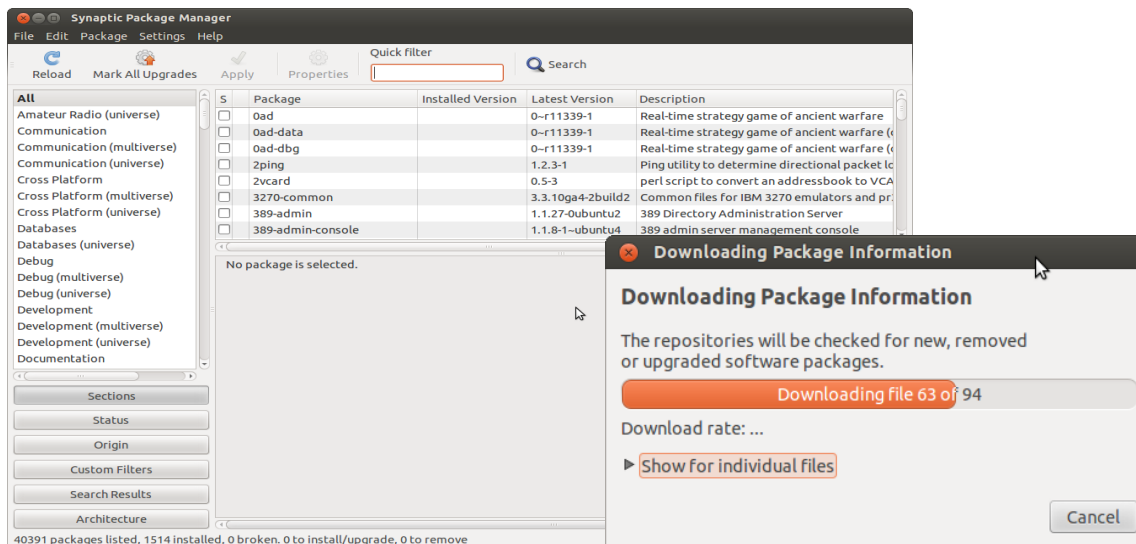
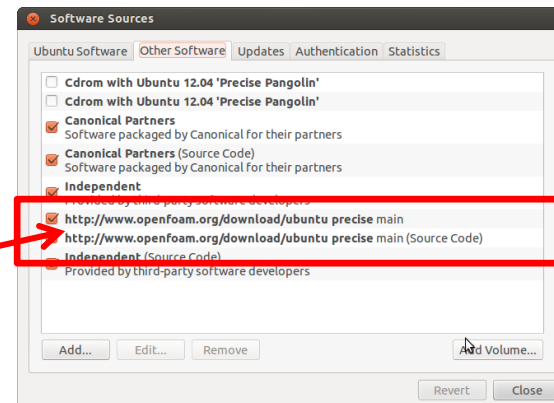
- Desktop 환경에서 OpenFOAM 2.3.0 설치
 - System → Administration → Synaptic Package Manager 실행
 - Synaptic Package Manager 에서 Settings → Repositories 실행
 - Other Software 탭에서 Canonical Partners 항목에 check
 - Updates 탭에서 Unsupported updates에 check
 - OpenFOAM 설치를 위한 Software Source 추가
 - Add 버튼 클릭
 - 아래와 같이 입력하고 Add Source 버튼 클릭
 - deb http://www.openfoam.org/download/ubuntu precise main





OpenFOAM 설치

- Desktop 환경에서 OpenFOAM 2.3.0 설치
 - Software Sources창에 openfoam repository 추가 확인
 - 두개의 openfoam 항목 중(Source Code)로 표시된 항목은 check box에서 check를 해제 하거나 Remove 버튼으로 삭제
 - Software Sources를 닫고 Synaptic Package Manager 창에서 Reload 버튼을 클릭하여 software source를 update





OpenFOAM 설치

- Desktop 환경에서 OpenFOAM 2.3.0 설치
 - Quick search 창에 openfoam을 입력, openfoam과 paraview가 검색됨
 - 각 항목의 check box에 클릭, Mark for Installation
 - Warning 창이 뜨면 openfoam230을 선택하고 Mark
 - Openfoam과 paraview 항목을 Mark 하고 Apply클릭

Synaptic Package Manager

File Edit Package Settings Help

Reload Mark All Upgrades Apply Properties **Rebuilding search index** Search

openfoam

S	Package	Installed Version	Latest Version	Description
<input type="checkbox"/>	openFoam220			
<input type="checkbox"/>	openfoam221			
<input type="checkbox"/>	openfoam222			
<input checked="" type="checkbox"/>	openfoam230			
<input type="checkbox"/>	openfoam211			
<input checked="" type="checkbox"/>	paraviewopenfoam410			
<input type="checkbox"/>	paraviewopenfoam3120			

Summary

Apply the following changes?

This is your last opportunity to look through the list of marked changes before they are applied.

Warning

You are about to install software that is not authenticated! Doing this may be individual to damage or take your system offline.

- ▶ NOT AUTHENTICATED
- ▶ To be installed
- ▶ Unchanged

Summary

622 packages will be held
18 new packages will be installed
792 MB of extra space will be used
205 MB have to be downloaded

Download package files only

Downloading Package Files

Downloading Package Files

Downloading file 2 of 18

Download rate: ...

Show for individual files

Cancel Apply



OpenFOAM 설치

- Terminal에서 OpenFOAM 2.3.0 설치
 - 최신판은 www.openfoam.org/download/에서 다운 받을 수 있음
 - 이전 버전이 필요한 경우 sourceforge.net/projects/foam/files에서 받을 수 있음
 - Ubuntu, SUSE, Red Hat (RHL)의 바이너리 버전도 있음
- 설치 대상 OS
 - Ubuntu Desktop 12.04 LTS (x86_64)
- OpenFOAM용 apt 저장소 추가
 - `$sudo vi /etc/apt/sources.list.d/openfoam.list`
 - deb <http://www.openfoam.com/download/ubuntu> precise main
- apt update
 - `$sudo apt-get update`
- OpenFOAM 패키지 확인
 - `$sudo apt-cache search OpenFOAM`
- OpenFOAM 설치
 - `$sudo apt-get install openfoam230`
 - “계속?” 또는 “검증없이 설치”라고 물으면 “y” 입력
- Paraview 설치
 - `$sudo apt-get install paraviewopenfoam410`
 - “계속?” 또는 “검증없이 설치”라고 물으면 “y” 입력

```
edward@debian: ~/Desktop
File Edit View Search Terminal Help
edward@debian ~/Desktop $ sudo vi /etc/apt/sources.list.d/openfoam.list
edward@debian ~/Desktop $ sudo apt-cache search OpenFOAM
openfoam222 - OpenFOAM
openfoam230 - OpenFOAM
paraviewopenfoam3120 - Paraview visualisation application
paraviewopenfoam410 - Paraview visualisation application
openfoam221 - OpenFOAM
openfoam220 - OpenFOAM
openfoam211 - OpenFOAM
openfoam210 - OpenFOAM
```



OpenFOAM 설치

- Terminal에서 OpenFOAM 2.3.0 설치

- 사용자 설정

- \$gedit ~/.bashrc에서 아래 내용 저장
 - source /opt/openfoam230/etc/bashrc
- 수정된 bashrc 읽음
 - ~/.bashrc

- OpenFOAM 동작 확인

- \$icoFoam -help

- 사용자 폴더 생성

- \$mkdir -p \$FOAM_RUN
 - ~/OpenFOAM/사용자-2.3.0/run

- 예제 실행

- \$cd \$FOAM_RUN
- \$cp -r \$FOAM_TUTORIALS/incompressible/icoFoam/cavity \$FOAM_RUN/cavity
- \$cd \$FOAM_RUN/cavity
- \$blockMesh
- \$icoFoam
- \$paraFoam

```
edward@debian: ~/OpenFOAM/edward-2.3.0/run
File Edit View Search Terminal Help
edward@debian ~/OpenFOAM/edward-2.3.0/run $ icoFoam -help
Usage: icoFoam [OPTIONS]
options:
  -case <dir>          specify alternate case directory, default is the cwd
  -noFunctionObjects   do not execute functionObjects
  -parallel            run in parallel
  -roots <(dir1 .. dirN)>
                       slave root directories for distributed running
  -srcDoc              display source code in browser
  -doc                display application documentation in browser
  -help               print the usage

Using: OpenFOAM-2.3.0 (see www.OpenFOAM.org)
Build: 2.3.0-f5222ca19ce6
```



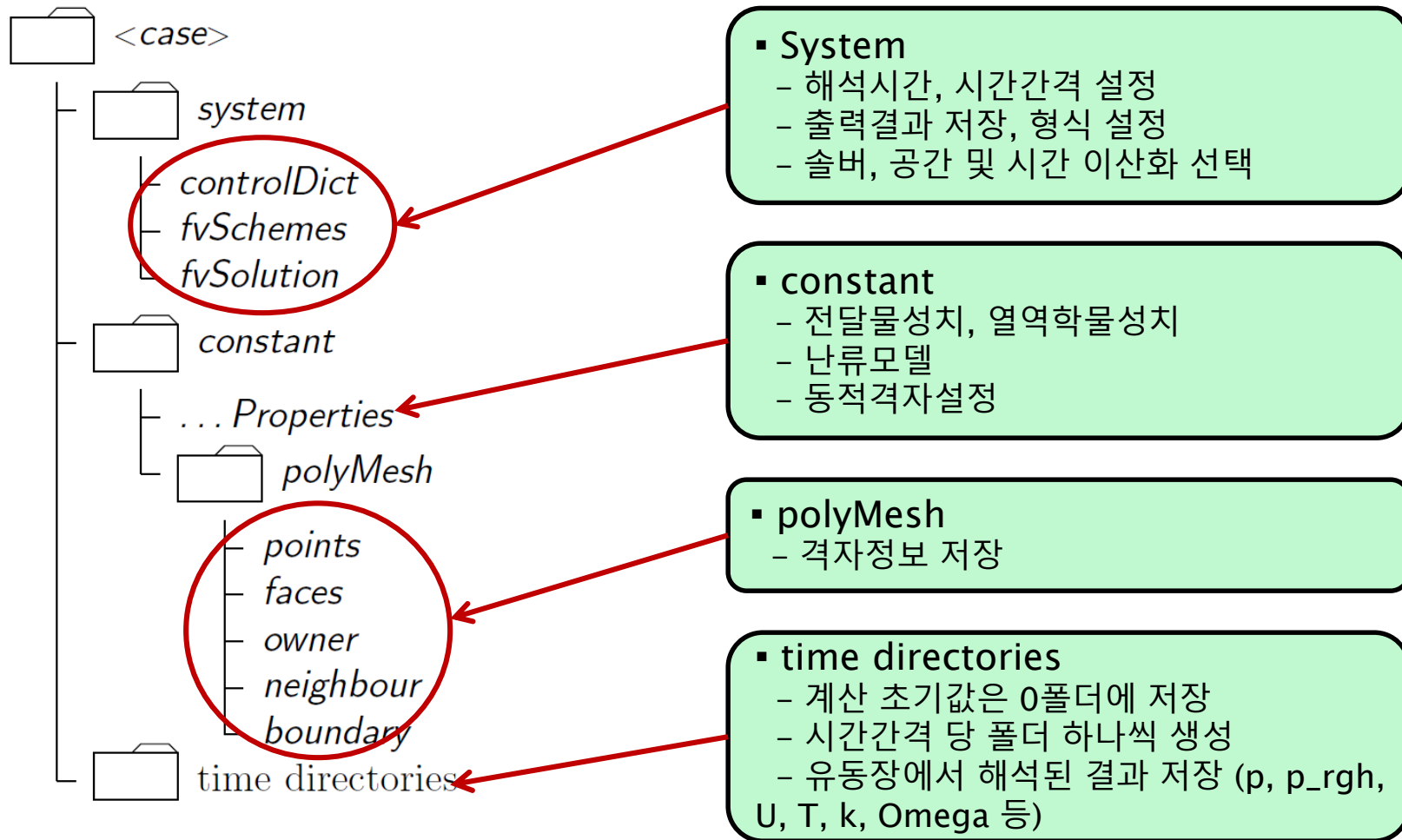
- OpenFOAM 첫 걸음 목표
- OpenFOAM 소개
 - OpenFOAM이란 무엇인가?
 - 방정식을 어떻게 적용하는가?
 - 유용한 도움말 및 설명서가 있는가?
- OpenFOAM 설치
 - Ubuntu 12.04 LTS 설치
 - Terminal에서 OpenFOAM 2.3.0 설치
 - SynapticPackManager에서 설치
- OpenFOAM으로 하는 첫 유동 해석
 - OpenFOAM의 일반적인 구조
 - 예제 1. Heat Transfer
 - 예제 2. Driven Cavity Flow
 - 예제 3. Poiseuille Flow
 - 예제 4. Bubble Rising (VOF)
- OpenFOAM에 방정식 추가 적용
 - Application의 일반적인 구조
 - 예제 5. iceFoam에 열 전달 방정식 추가
 - 예제 6. 열 전달이 포함된 Driven Cavity





OpenFOAM으로 하는 첫 유동해석

- OpenFOAM Case 파일의 일반적인 구조





OpenFOAM으로 하는 첫 유동해석

- 예제 1. Heat Transfer (1)

- OpenFOAM tutorials의 예제

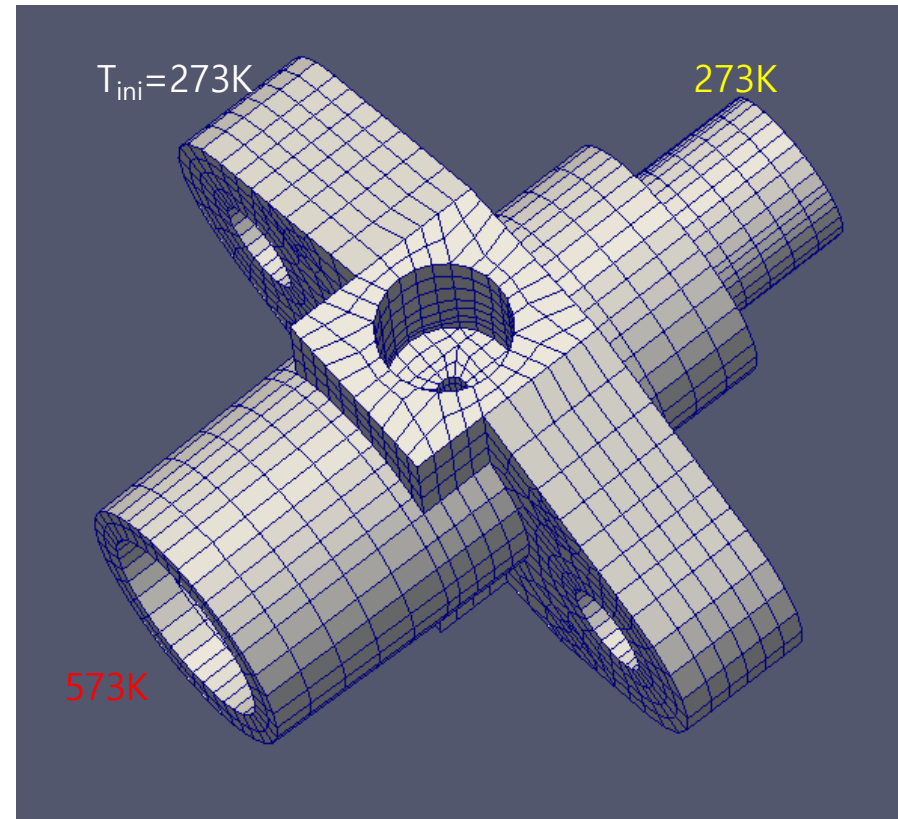
- 격자 변환 사례

- Ansys 격자를 OpenFOAM으로 변환
- ansysToFoam 유틸리티 사용

- 열 전달 적용

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (D_T \nabla T)$$

- 솔버는 laplacianFoam 사용





OpenFOAM으로 하는 첫 유동해석

• 예제 1. Heat Transfer (2)

```
$run  
$cp -r FOAM_TUTORIALS/basic/laplacianFoam/flange $FOAM_RUN/basic/ex1  
$cd basic/ex1  
$gedit Allrun
```

– Allrun 스크립터

- Ansys 격자 변환
- 해석 수행
- 후처리
 - Enight로 내보내기

– Ansys 격자 변환

- \$ansysToFoam flange.ans -scale 0.001

– Enight로 내보내기

- \$foamToEnight
- \$foamToEnightParts

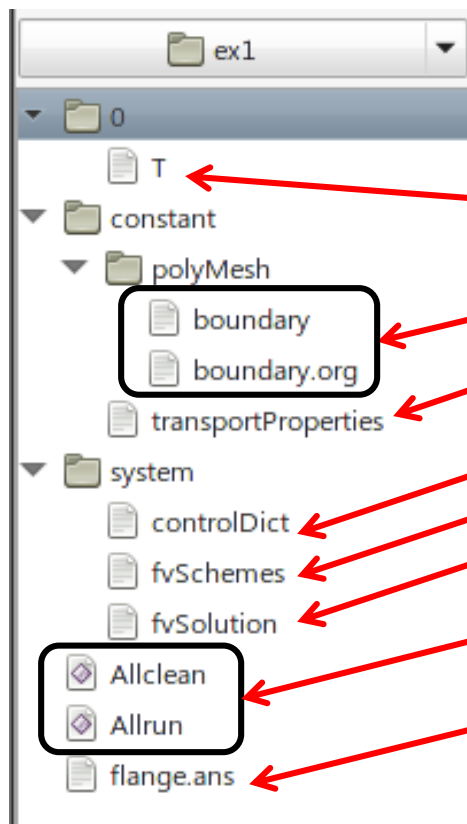
```
1 #!/bin/sh  
2 cd ${0%/*} || exit 1 # run from this directory  
3  
4 # Source tutorial run functions  
5 . $WM_PROJECT_DIR/bin/tools/RunFunctions  
6  
7 # Get application name  
8 application=`getApplication`  
9  
10 runAnsysToFoam()  
11 {  
12     if [ -f log.ansysToFoam ]  
13     then  
14         echo "ansysToFoam already run on $PWD: remove log file to re-run"  
15     else  
16         echo "ansysToFoam: converting mesh $1"  
17         ansysToFoam $1 -scale $2 > log.ansysToFoam 2>&1  
18     fi  
19 }  
20  
21 runAnsysToFoam flange.ans 0.001  
22 runApplication $application  
23 runApplication foamToEnight  
24 runApplication foamToEnightParts  
25 runApplication foamToVTK  
26  
27 # ----- end-of-file
```



OpenFOAM으로 하는 첫 유동해석

예제 1. Heat Transfer (3)

```
$run  
$cp -r FOAM_TUTORIALS/basic/laplacianFoam/flange $FOAM_RUN/basic/ex1  
$cd basic/ex1  
$ls
```



온도의 초기조건 및 경계조건

ansysToFoam으로 격자정보가 저장됨
열 확산 계수 [m²/s]

계산설정 값 (시간, 시간간격, 출력형식 등)
공간 및 시간 이산화, 보간법 설정 (ddt, div, laplacian 등)
선형 방정식 해법 설정

스크립터가 자동으로 실행 (Allrun), 삭제 및 초기화 (Allclean)

ANSYS로 만든 격자



OpenFOAM으로 하는 첫 유동해석

• 예제 1. Heat Transfer (4)

```
$run
$cp -r FOAM_TUTORIALS/basic/laplacianFoam/flange $FOAM_RUN/basic/ex1
$cd basic/ex1
$edit 0/T
```

```

1  *-----*
2  |         |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
3  |         |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
4  |         |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
5  |         |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
6  |         |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
7  *-----*
8  FoamFile
9  {
10     version      2.0;
11     format       ascii;
12     class        volScalarField;
13     object       T;
14 }
15 // *****
16
17 dimensions      [0 0 0 1 0 0 0];
18
19 internalField    uniform 273;
20
21 boundaryField
22 {
23     patch1
24     {
25         type      zeroGradient;
26     }
27
28     patch2
29     {
30         type      fixedValue;
31         value     uniform 273;
32     }
33
34     patch3
35     {
36         type      zeroGradient;
37     }
38
39     patch4
40     {
41         type      fixedValue;
42         value     uniform 573;
43     }
44 }
45 // *****

```

0/T 온도 초기 값 및 경계 값 설정

- 온도의 차원 K [kg m s T kgmol A cd]
- 온도 초기 값은 전영역에 uniform으로, T=273K

경계조건

- zerogradient: $\text{flux} = 0 \quad \frac{\partial T}{\partial x_i} = 0$
- 고정 값, T=273K
- 고정 값, T=573K



OpenFOAM으로 하는 첫 유동해석

- 예제 1. Heat Transfer (5)

```
$run  
$cp -r FOAM_TUTORIALS/basic/laplacianFoam/flange $FOAM_RUN/basic/ex1  
$cd basic/ex1  
$edit constant/transportProperties
```

```
1  *----- C++ -----*  
2  
3  =====  
4  \  Field          /  OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox  
5  \  Operation     /  Version: 2.3.0  
6  \  And          /  Web: www.OpenFOAM.org  
7  \  Manipulation /  
8  *-----*  
9  FoamFile  
10 {  
11   version      2.0;  
12   format       ascii;  
13   class        dictionary;  
14   location     "constant";  
15   object       transportProperties;  
16 }  
17 // *****  
18 DT            DT [ 0 2 -1 0 0 0 ] 4e-05;  
19  
20  
21 // *****
```

열 확산 계수

- 열 확산 계수 차원 설정 [kg m s T kgmol A cd]
- 계수 값 설정, $DT=4 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$



OpenFOAM으로 하는 첫 유동해석

• 예제 1. Heat Transfer (6)

```
$run  
$cp -r FOAM_TUTORIALS/basic/laplacianFoam/flange $FOAM_RUN/basic/ex1  
$cd basic/ex1  
$edit system/controlDict
```

```
1  *-----* C++ *-----*  
2  |-----|  
3  | \      / F i e l d      OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox  
4  |  \    / O p e r a t i o n  Version: 2.3.0  
5  |   \  / A n d              Web:    www.OpenFOAM.org  
6  |    \/ M a n i p u l a t i o n  
7  *-----*  
8  FoamFile  
9  {  
10     version      2.0;  
11     format        ascii;  
12     class         dictionary;  
13     location      "system";  
14     object        controlDict;  
15 }  
16 // *-----*  
17  
18 application      laplacianFoam;  
19  
20 startFrom        latestTime;  
21  
22 startTime        0;  
23  
24 stopAt           endTime;  
25  
26 endTime          3;  
27  
28 deltaT           0.005;  
29  
30 writeControl     runtime;  
31  
32 writeInterval    0.1;  
33  
34 purgeWrite       0;  
35  
36 writeFormat      ascii;  
37  
38 writePrecision   6;  
39  
40 writeCompression off;  
41  
42 timeFormat       general;  
43  
44 timePrecision    6;  
45  
46 runtimeModifiable true;  
47  
48  
49 // *-----*
```

계산 설정

- 해석 솔버: laplacianFoam
- 시작 시간: 0s, 종료 시간: 3s
- 시간간격: 0.005s
- 파일출력 시간간격: 0.1s
- 파일출력 형식: ascii
- 파일출력 정확도: 소수점 6자리
- 시간출력 정확도: 소수점 6자리



OpenFOAM으로 하는 첫 유동해석

예제 1. Heat Transfer (7)

- 요약

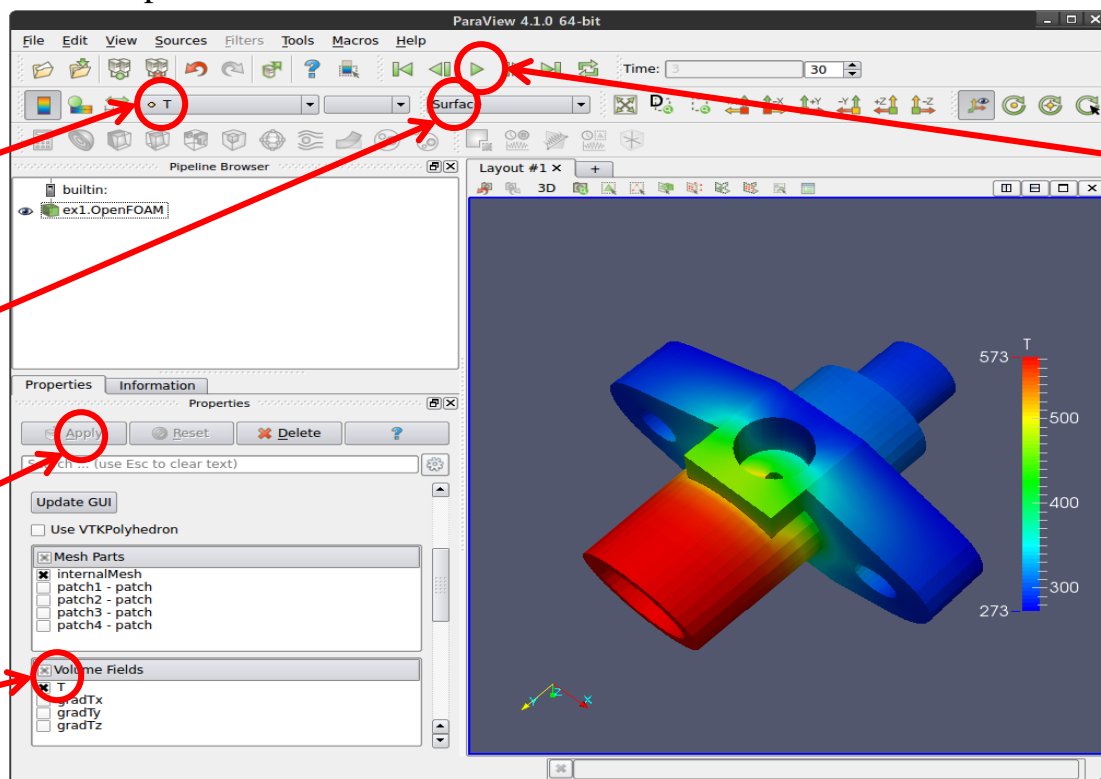
- 격자변환 `$ansysToFoam flange.ans -scale 0.001` → ▪ polyMesh 폴더에 격자 파일 생성
- 격자형상 확인 `$paraFoam`
- 해석 실행 `$laplacianFoam` → ▪ 시간에 따른 해석결과 폴더 생성
- 해석결과 후처리 `$ paraFoam`

4. 볼 필드 선택

3. Surface 선택

2. apply

1. 표시할 필드 변수 선택



5. 모든 시간 단계를 보려면 play

OpenFOAM으로 하는 첫 유동해석

- 예제 2. Driven Cavity Flow (1)

- OpenFOAM tutorials의 예제

- 격자생성

- blockMesh 유틸리티 사용

- 비압축성 Navier-Stokes

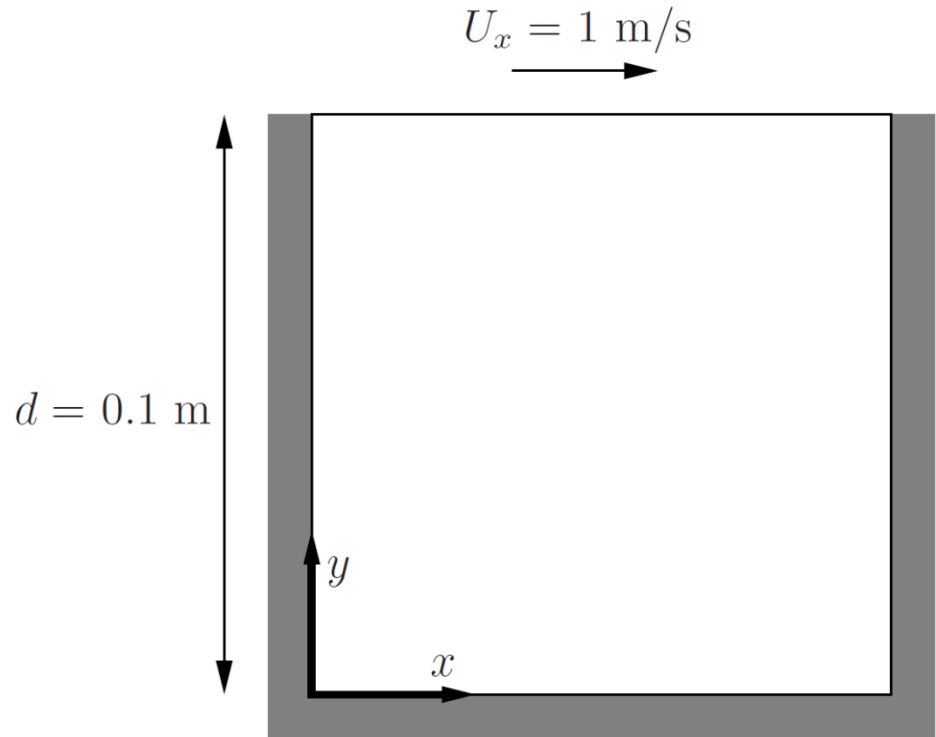
$$\rho U = 0$$

$$\rho \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \rho (\mathbf{U} \cdot \nabla) \mathbf{U} = \rho (\nabla \cdot \boldsymbol{\tau}) - \nabla p$$

- 솔버는 icoFoam 사용

- 후처리

- paraFoam 사용



OpenFOAM으로 하는 첫 유동해석

예제 2. Driven Cavity Flow (2)

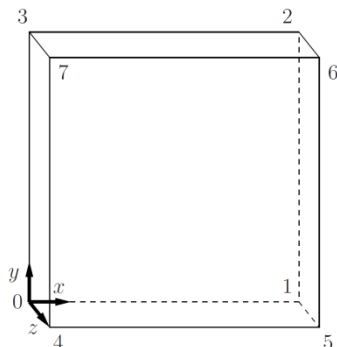
```
$run
$cp -r FOAM_TUTORIALS/incompressible/icoFoam/cavity $FOAM_RUN/basic/ex2
$cd basic/ex2
$gedit constant/polyMesh/blockMeshDict
```

```
17 convertToMeters 0.1;
18
19 vertices
20 {
21   (0 0 0)
22   (1 0 0)
23   (1 1 0)
24   (0 1 0)
25   (0 0 0.1)
26   (1 0 0.1)
27   (1 1 0.1)
28   (0 1 0.1)
29 };
30
31 blocks
32 (
33   hex (0 1 2 3 4 5 6 7) (20 20 1) simpleGrading (1 1 1)
34 );
35
36 edges
37 {
38 };
39
40 boundary
41 (
42   movingWall
43   {
44     type wall;
45     faces
46     (
47       (3 7 6 2)
48     );
49   }
50   fixedWalls
51   {
52     type wall;
53     faces
54     (
55       (0 4 7 3)
56       (2 6 5 1)
57       (1 5 4 0)
58     );
59   }
60   frontAndBack
61   {
62     type empty;
63     faces
64     (
65       (0 3 2 1)
66       (4 5 6 7)
67     );
68   }
69 );
```

- 격자 점의 정의
- Block 정의
- 격자 정의 (균질 격자, 2D 해석을 위해 z방향은 1개로 구성)
- 각 경계 면에 경계 유형 정의
- 2 개의 x-y 평면은 empty로 처리 (2D 계산)

blockMesh (간단한 형상의 격자생성 유틸리티)

▪ OpenFOAM은 3차원 형상을 사용



- 격자 점의 순서가 중요 (보이는 쪽에서 반시계 방향)
- 이 계산에서는 2차원 고려

- 경계의 유형
- patch (일반 유형)
 - wall (벽조건)
 - cyclic (주기적 조건)
 - symmetryPlane (대칭면 조건)
 - wedge (축대칭 조건)
 - empty (차원 감소)



OpenFOAM으로 하는 첫 유동해석

예제 2. Driven Cavity Flow (3)

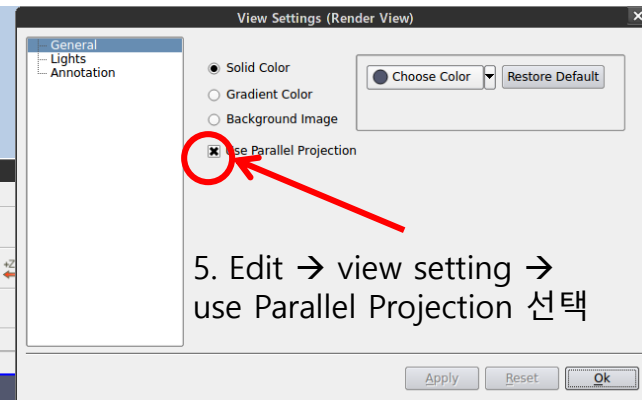
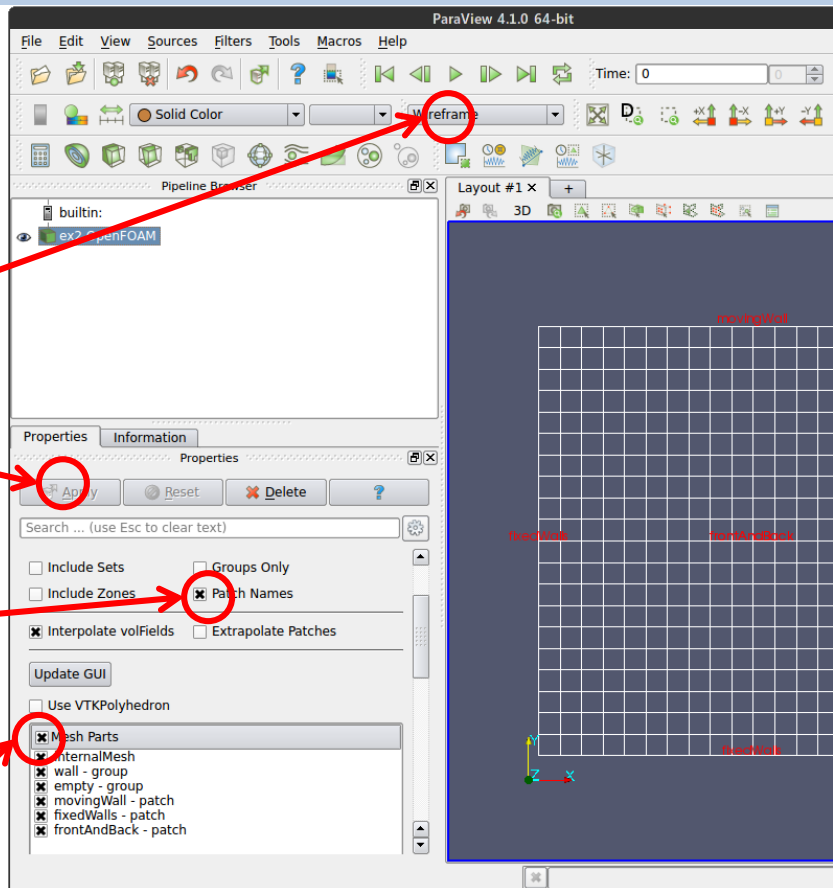
\$blockMesh ← 격자 생성
\$checkMesh ← 격자 오류 확인
\$paraFoam ← 격자 가시화

4. wireframe 선택

3. apply

2. 경계 이름 선택

1. 표시할 격자
부분 선택



5. Edit → view setting →
use Parallel Projection 선택



OpenFOAM으로 하는 첫 유동해석

• 예제 2. Driven Cavity Flow (5)

```
$run  
$cp -r FOAM_TUTORIALS/incompressible/icoFoam/cavity $FOAM_RUN/basic/ex2  
$cd basic/ex2  
$gedit 0/U
```

```
1  /*-----*-- C++ -*-----*/  
2  
3  F i e l d      OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox  
4  O peration    Version: 2.3.0  
5  A nd          Web: www.OpenFOAM.org  
6  M anipulation  
7  
8  FoamFile  
9  {  
10   version      2.0;  
11   format       ascii;  
12   class        volVectorField;  
13   object       U;  
14 }  
15 // *****  
16  
17 dimensions    [0 1 -1 0 0 0];  
18  
19 internalField uniform (0 0 0);  
20  
21 boundaryField  
22 {  
23   movingWall  
24   {  
25     type        fixedValue;  
26     value       uniform (1 0 0);  
27   }  
28  
29   fixedWalls  
30   {  
31     type        fixedValue;  
32     value       uniform (0 0 0);  
33   }  
34  
35   frontAndBack  
36   {  
37     type        empty;  
38   }  
39 }  
40  
41 // *****
```

0/U 유동속도 초기 값 및 경계 값 설정

- 속도의 차원 m/s [kg m s T kgmol A cd]
- 속도 초기 값은 전 영역에 uniform으로, 0 m/s

경계조건

- 고정 값, U=1m/s (x 방향 만)
- 고정 값, U=0m/s (전 방향에 대해)
- 차원 축소: empty



OpenFOAM으로 하는 첫 유동해석

예제 2. Driven Cavity Flow (6)

```
$run  
$cp -r FOAM_TUTORIALS/incompressible/icoFoam/cavity $FOAM_RUN/basic/ex2  
$cd basic/ex2  
$gedit 0/p
```

```
1  *-----*  
2  |         |  
3  | \       | F i e l d       | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox  
4  |  \      | O p e r a t i o n | Version: 2.3.0  
5  |   \     | A n d             | Web: www.OpenFOAM.org  
6  |    \    | M a n i p u l a t i o n |  
7  |_____|  
8  FoamFile  
9  {  
10   version      2.0;  
11   format       ascii;  
12   class        volScalarField;  
13   object       p;  
14 }  
15 // *****  
16  
17 dimensions    [0 2 -2 0 0 0];  
18  
19 internalField  uniform 0;  
20  
21 boundaryField  
22 {  
23   movingWall  
24   {  
25     type        zeroGradient;  
26   }  
27   fixedWalls  
28   {  
29     type        zeroGradient;  
30   }  
31 }  
32  
33 frontAndBack  
34 {  
35   type          empty;  
36 }  
37 }  
38  
39 // *****
```

0/p 압력 초기 값 및 경계 값 설정

- 압력의 차원 m^2/s^2 [kg m s T kgmol A cd]

$$p = \frac{p\phi}{r}$$

- 압력 초기 값은 전 영역에 uniform으로, 0

경계조건

- zeroGradient: flux = 0

- 차원 축소: empty



OpenFOAM으로 하는 첫 유동해석

- 예제 2. Driven Cavity Flow (7)

```
$run  
$cp -r FOAM_TUTORIALS/incompressible/icoFoam/cavity $FOAM_RUN/basic/ex2  
$cd basic/ex2  
$edit system/controlDict
```

```
1  *-- C++ --*  
2  =====  
3  F ield      OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox  
4  O peration  Version: 2.3.0  
5  A nd        Web: www.OpenFOAM.org  
6  M anipulation  
7  =====  
8  FoamFile  
9  {  
10     version      2.0;  
11     format       ascii;  
12     class        dictionary;  
13     location     "system";  
14     object       controlDict;  
15 }  
16 // *****  
17  
18 application    icoFoam;  
19  
20 startFrom      startTime;  
21  
22 startTime     0;  
23  
24 stopAt        endTime;  
25  
26 endTime       0.5;  
27  
28 deltaT        0.005;  
29  
30 writeControl   timeStep;  
31  
32 writeInterval  20;  
33  
34 purgeWrite    0;  
35  
36 writeFormat    ascii;  
37  
38 writePrecision 6;  
39  
40 writeCompression off;  
41  
42 timeFormat     general;  
43  
44 timePrecision  6;  
45  
46 runTimeModifiable true;  
47  
48  
49 // *****
```

계산 설정

- 해석 솔버: icoFoam
- 시작 시간: 0s, 종료 시간: 0.5s
- 시간간격: 0.005s
- 파일출력 간격: 20번 마다
- 파일출력 형식: ascii
- 파일출력 정확도: 소수점 6자리
- 시간출력 정확도: 소수점 6자리



OpenFOAM으로 하는 첫 유동해석

- 예제 2. Driven Cavity Flow (8)

```
$run  
$cp -r FOAM_TUTORIALS/incompressible/icoFoam/cavity $FOAM_RUN/basic/ex2  
$cd basic/ex2  
$icoFoam  
$paraFoam
```

The screenshot shows the OpenFOAM GUI interface. On the left, the Pipeline Browser shows a built-in pipeline named 'ex2.OpenFOAM'. Below it, the Properties panel is visible, showing 'Mesh Parts' and 'Volume Fields' sections. The main 3D view area displays a 2D velocity magnitude plot of the driven cavity flow. A color scale on the right indicates the velocity magnitude, ranging from 0 (blue) to 1 (red). The terminal window in the top right corner shows the execution output for icoFoam at Time = 0.5, including Courant Number, smoothSolver results, and execution time.



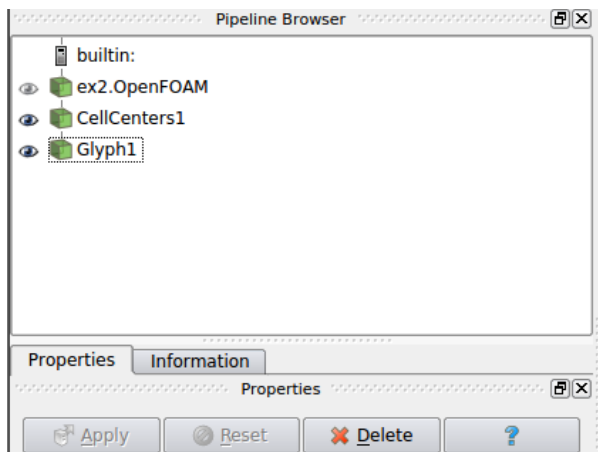
OpenFOAM으로 하는 첫 유동해석

예제 2. Driven Cavity Flow (9)

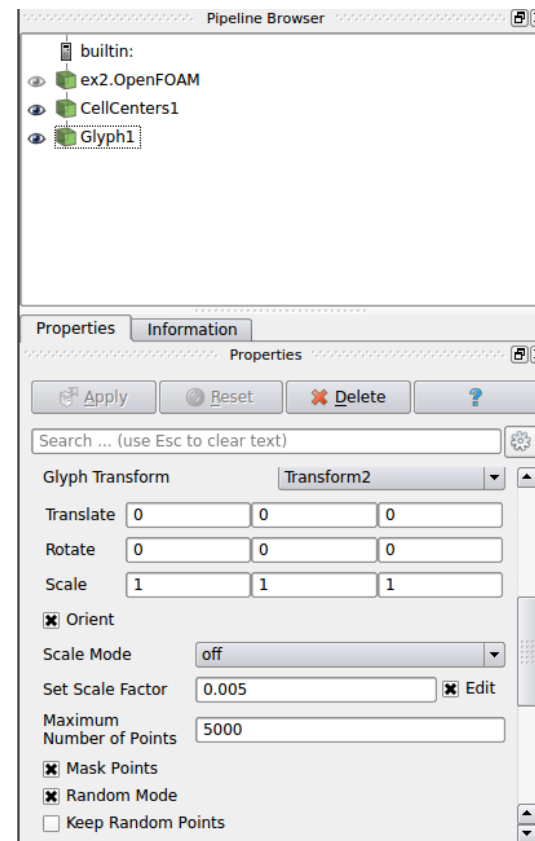
```
$run  
$cp -r FOAM_TUTORIALS/incompressible/icoFoam/cavity $FOAM_RUN/basic/ex2  
$cd basic/ex2  
$paraFoam
```

paraFoam 속도벡터 표현

- CellCenter 필터를 선택해 셀의 중심값을 취함
- filters → alphabetical → CellCenter → Apply



- 속도벡터를 그리기 위해 Glyph를 적용
- filters → alphabetical → Glyph → Properties
→ Apply

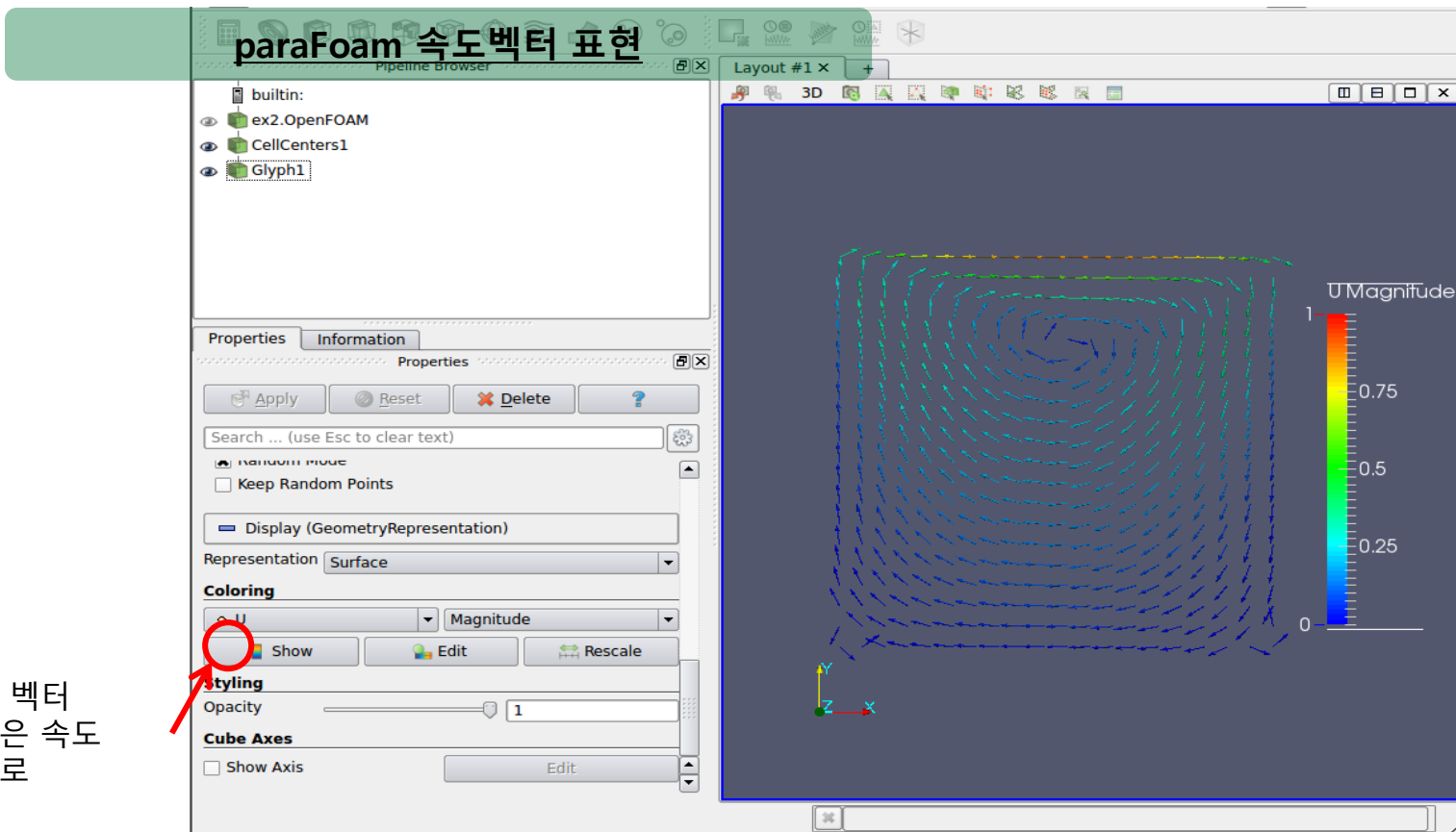




OpenFOAM으로 하는 첫 유동해석

- 예제 2. Driven Cavity Flow (10)

```
$run  
$cp -r FOAM_TUTORIALS/incompressible/icoFoam/cavity $FOAM_RUN/basic/ex2  
$cd basic/ex2  
$paraFoam
```



속도 벡터
색상은 속도
크기로



OpenFOAM으로 하는 첫 유동해석

- 예제 3. Poiseuille Flow (1)

- OpenFOAM tutorials의 예제를 이용한 새로운 예제 만들기

- 2차원 대칭 조건의 Poiseuille 유동 해석

- 격자생성

- blockMesh 유틸리티 사용

- 비압축성 Navier-Stokes

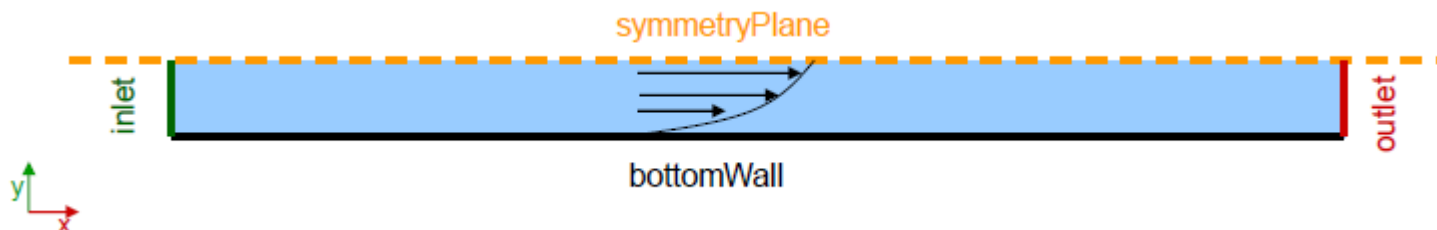
- 솔버는 icoFoam 사용

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = 0$$

$$\rho \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \mathbf{U}) = \nabla \cdot (\mu \nabla \mathbf{U}) - \nabla p$$

- 후처리

- paraFoam 사용



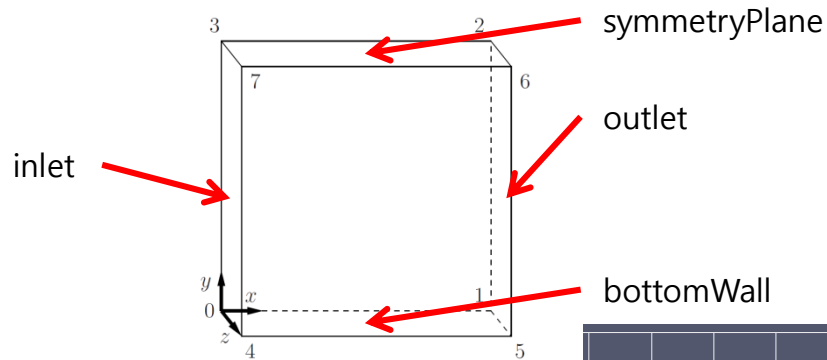


OpenFOAM으로 하는 첫 유동해석

예제 3. Poiseuille Flow (2)

```
$run  
$cp -r FOAM_TUTORIALS/incompressible/icoFoam/cavity $FOAM_RUN/basic/ex3  
$cd basic/ex3  
$gedit constant/polyMesh/blockMeshDict  
$blockMesh
```

blockMesh (Poiseuille flow 형상)



```
17 convertToMeters 0.1;  
18  
19 vertices  
20 (  
21     (0 0 0)  
22     (20 0 0)  
23     (20 1 0)  
24     (0 1 0)  
25     (0 0 0.1)  
26     (20 0 0.1)  
27     (20 1 0.1)  
28     (0 1 0.1)  
29 );  
30  
31 blocks  
32 (  
33     hex (0 1 2 3 4 5 6 7) (100 20 1) simpleGrading (1 5 1)  
34 );  
35
```

```
40 boundary  
41 (  
42     inlet  
43     {  
44         type patch;  
45         faces  
46         (  
47             (0 4 7 3)  
48         );  
49     }  
50     outlet  
51     {  
52         type patch;  
53         faces  
54         (  
55             (2 6 5 1)  
56         );  
57     }  
58     bottomWall  
59     {  
60         type wall;  
61         faces  
62         (  
63             (1 5 4 0)  
64         );  
65     }  
66     symmetryPlane  
67     {  
68         type symmetryPlane;  
69         faces  
70         (  
71             (3 7 6 2)  
72         );  
73     }  
74     frontAndBack  
75     {  
76         type empty;  
77         faces  
78         (  
79             (0 3 2 1)  
80             (4 5 6 7)  
81         );  
82     }  
83 );
```




OpenFOAM으로 하는 첫 유동해석

예제 3. Poiseuille Flow (3)

```
$run  
$cp -r FOAM_TUTORIALS/incompressible/icoFoam/cavity $FOAM_RUN/basic/ex3  
$cd basic/ex3  
$gedit 0/U
```

```
1  
2  
3  
4  
5  
6  
7  
8 FoamFile  
9 {  
10     version      2.0;  
11     format       ascii;  
12     class        volVectorField;  
13     object       U;  
14 }  
15  
16  
17 dimensions      [0 1 -1 0 0 0];  
18  
19 internalField   uniform (0 0 0);  
20  
21 boundaryField  
22 {  
23     inlet  
24     {  
25         type      fixedValue;  
26         value     uniform (1 0 0);  
27     }  
28     outlet  
29     {  
30         type      zeroGradient;  
31     }  
32     bottomWall  
33     {  
34         type      fixedValue;  
35         value     uniform (0 0 0);  
36     }  
37     symmetryPlane  
38     {  
39         type      symmetryPlane;  
40     }  
41     frontAndBack  
42     {  
43         type      empty;  
44     }  
45 }  
46  
47  
48  
49  
50  
51
```

0/U 유동속도 초기 값 및 경계 값 설정

- 속도의 차원 m/s [kg m s T kgmol A cd]
- 속도 초기 값은 전 영역에 uniform으로, 0 m/s

경계조건

- 고정 값, U=1m/s (x 방향 만)
- zeroGradient: flux=0
- 고정 값, U=0m/s (전 방향에 대해)
- 대칭조건: symmetryPlane
- 차원 축소: empty



OpenFOAM으로 하는 첫 유동해석

예제 3. Poiseuille Flow (4)

```
$run  
$cp -r FOAM_TUTORIALS/incompressible/icoFoam/cavity $FOAM_RUN/basic/ex3  
$cd basic/ex3  
$gedit 0/p
```

```
1  
2  
3  
4  
5  
6  
7  
8 FoamFile  
9  
10 {  
11     version      2.0;  
12     format       ascii;  
13     class        volScalarField;  
14     object       p;  
15 }  
16  
17 // *****  
18 dimensions      [0 2 -2 0 0 0];  
19  
20 internalField    uniform 0;  
21  
22 boundaryField  
23 {  
24     inlet  
25     {  
26         type      zeroGradient;  
27     }  
28     outlet  
29     {  
30         type      fixedValue;  
31         value     uniform 0;  
32     }  
33     bottomWall  
34     {  
35         type      zeroGradient;  
36     }  
37     symmetryPlane  
38     {  
39         type      symmetryPlane;  
40     }  
41     frontAndBack  
42     {  
43         type      empty;  
44     }  
45 }  
46  
47  
48  
49  
50
```

0/p 압력 초기 값 및 경계 값 설정

- 압력의 차원 m^2/s^2 [kg m s T kgmol A cd] $p = \frac{p\phi}{r}$
- 압력 초기 값은 전 영역에 uniform으로, 0

경계조건

- zeroGradient: flux=0
- 고정 값, 0
- 대칭조건: symmetryPlane
- 차원 축소: empty

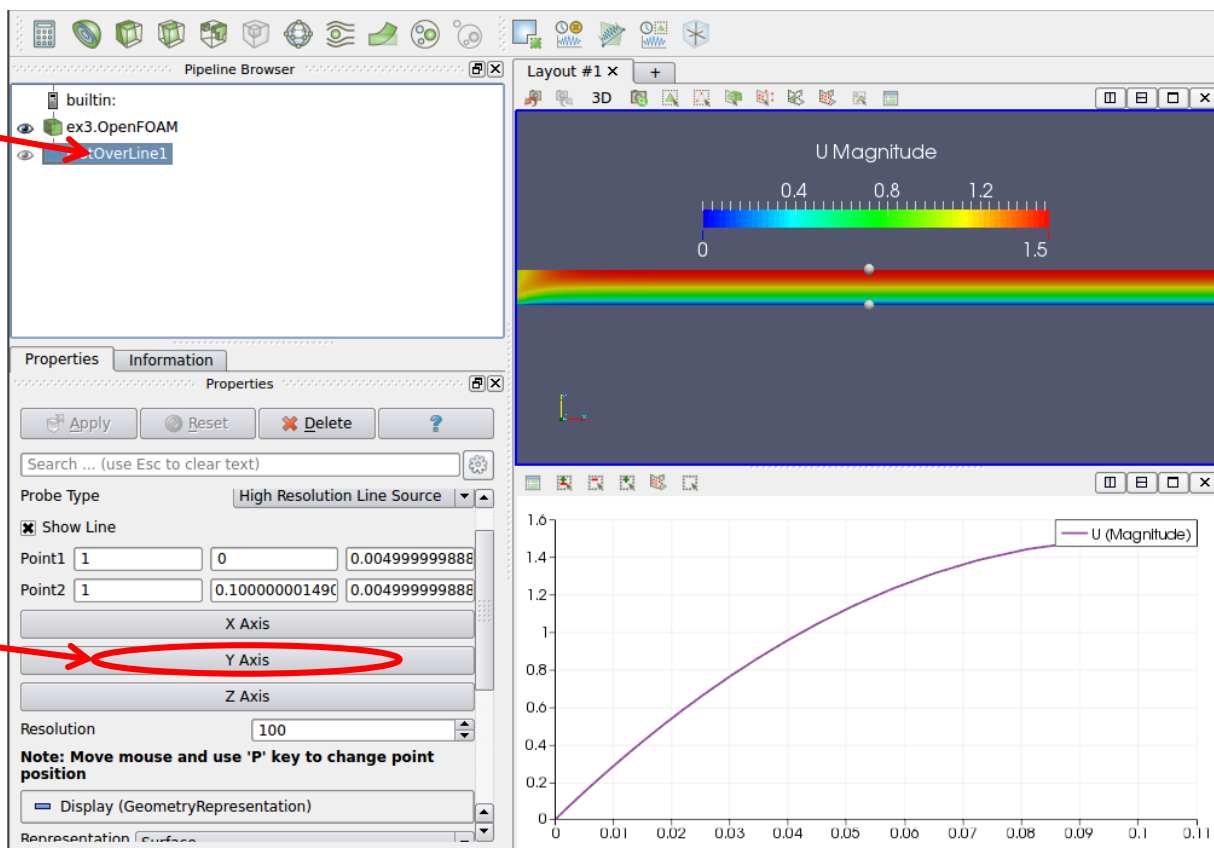


OpenFOAM으로 하는 첫 유동해석

• 예제 3. Poiseuille Flow (5)

```
$run  
$cp -r FOAM_TUTORIALS/incompressible/icoFoam/cavity $FOAM_RUN/basic/ex3  
$cd basic/ex3  
$icoFoam  
$paraFoam
```

1. Filter → Data Analysis
→ Plot Over Line



2. Y축 방향으로 속도 형상
추출을 위해 y축 선택

- 예제 4. Bubble Rising (1)

- 물에서 기포 상승 해석
 - Tutorials의 damBreak 예제를 참조하여 문제 맞게 수정
- 비압축성 Navier-Stokes, 상 경계면 포착은 VOF

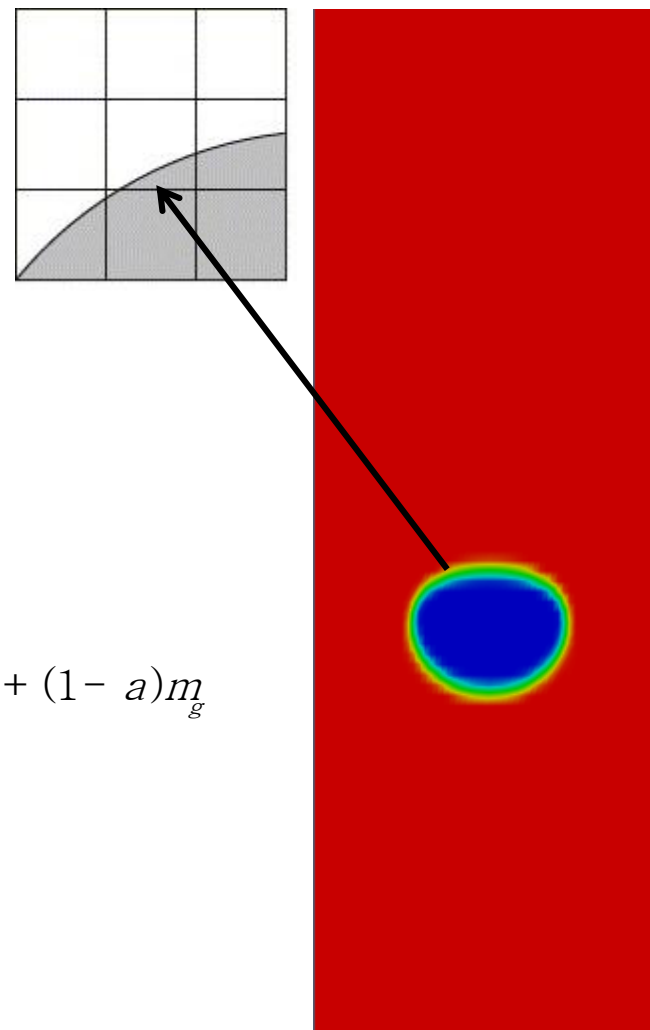
$$\rho U = 0$$

$$\frac{\rho a}{\rho t} + \rho (Ua) = 0$$

$$\frac{\rho rU}{\rho t} + \rho (rUU) = -\rho p \quad \rho (m^2 U)$$

$$U = aU_l + (1-a)U_g \quad r = ar_l + (1-a)r_g \quad m = am_l + (1-a)m_g$$

- 솔버는 interFoam 사용
- 유동장 초기화
 - setFields 유틸리티 사용





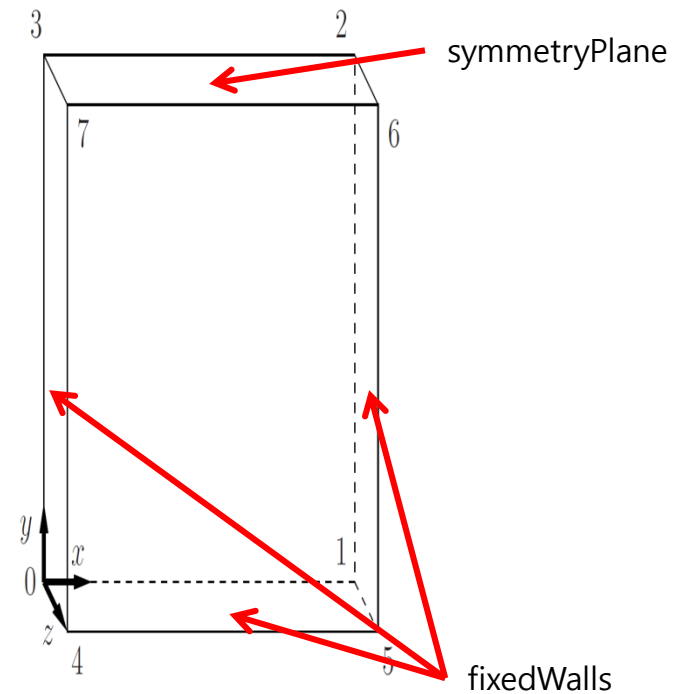
OpenFOAM으로 하는 첫 유동해석

예제 4. Bubble Rising (2)

```
$run  
$cp -r FOAM_TUTORIALS/multiphase/interFoam/laminar/dambreak $FOAM_RUN/basic/ex4  
$cd basic/ex4  
$cp -r ../ex3/constant.polyMesh/blockMeshDict constant/polyMesh/.  
$gedit constant/polyMesh/blockMeshDict
```

```
17 convertToMeters 0.01;  
18  
19 vertices  
20 (  
21 ( 0 0 0 )  
22 ( 0.5 0 0 )  
23 ( 0.5 1.5 0 )  
24 ( 0 1.5 0 )  
25 ( 0 0 0.1 )  
26 ( 0.5 0 0.1 )  
27 ( 0.5 1.5 0.1 )  
28 ( 0 1.5 0.1 )  
29 );  
30  
31 blocks  
32 (  
33 hex (0 1 2 3 4 5 6 7) (60 100 1) simpleGrading (1 1 1)  
34 );  
35  
36 edges  
37 (  
38 );  
39  
40 boundary  
41 (  
42 atmosphere  
43 {  
44 type patch;  
45 faces  
46 (  
47 (3 7 6 2)  
48 );  
49 }  
50 fixedWalls  
51 {  
52 type wall;  
53 faces  
54 (  
55 (0 4 7 3)  
56 (2 6 5 1)  
57 (1 5 4 0)  
58 );  
59 }  
60 frontAndBack  
61 {  
62 type empty;  
63 faces  
64 (  
65 (0 3 2 1)  
66 (4 5 6 7)  
67 );  
68 }  
69 );  
70
```

blockMesh (DamBreak 형상 수정)





OpenFOAM으로 하는 첫 유동해석

• 예제 4. Bubble Rising (3)

```
$run  
$cp -r FOAM_TUTORIALS/multiphase/interFoam/laminar/dambreak $FOAM_RUN/basic/ex4  
$cd basic/ex4  
$gedit 0/alpha.water.org
```

```
1  *-----* C++ *-----*  
2  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |  
3  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |  
4  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |  
5  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |  
6  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |  
7  *-----*  
8  FoamFile  
9  {  
10     version      2.0;  
11     format       ascii;  
12     class        volScalarField;  
13     object       alpha.water;  
14 }  
15 // *****  
16  
17 dimensions      [0 0 0 0 0 0 0];  
18  
19 internalField   uniform 0;  
20  
21 boundaryField  
22 {  
23     fixedWalls  
24     {  
25         type      zeroGradient;  
26     }  
27  
28     atmosphere  
29     {  
30         type      fixedValue;  
31         value     uniform 1;  
32     }  
33  
34     defaultFaces  
35     {  
36         type      empty;  
37     }  
38 }  
39  
40 // *****
```

0/alpha.water.org VOF 초기 값 및 경계 값 설정

- alpha.water는 유동장 내부의 가스/액체 분포
 - alpha.water=1, 물
 - alpha.water=0, 가스
- setFields로 계산 전에 초기화 되기 때문에 여기에서는 경계 조건만 작성
- 0/alpha.water는 setFields 시 다시 쓰여지기 때문에 원본은 0/alpha.water.org로 저장 한다.



OpenFOAM으로 하는 첫 유동해석

예제 4. Bubble Rising (4)

```
$run  
$cp -r FOAM_TUTORIALS/multiphase/interFoam/laminar/dambreak $FOAM_RUN/basic/ex4  
$cd basic/ex4  
$gedit 0/p_rgh
```

```
1 //=====  
2 //-----  
3 //-----  
4 //-----  
5 //-----  
6 //-----  
7 //-----  
8 FoamFile  
9 {  
10     version      2.0;  
11     format       ascii;  
12     class        volScalarField;  
13     object       p_rgh;  
14 }  
15 // * * * * *  
16  
17 dimensions      [1 -1 -2 0 0 0];  
18  
19 internalField   uniform 0;  
20  
21 boundaryField  
22 {  
23     fixedWalls  
24     {  
25         type          fixedFluxPressure;  
26         value          uniform 0;  
27     }  
28  
29     atmosphere  
30     {  
31         type          fixedValue;  
32         value          uniform 1e5;  
33     }  
34  
35     defaultFaces  
36     {  
37         type          empty;  
38     }  
39 }  
40  
41 // * * * * *
```

0/p_rgh 압력 초기 값 및 경계 값 설정

- 여기에서 수압 (hydrostatic pressure 사용)
- 압력의 차원 kg/m-s^2 [kg m s T kgmol A cd]
- 압력 초기 값은 전 영역에 uniform으로, 0



OpenFOAM으로 하는 첫 유동해석

• 예제 4. Bubble Rising (5)

```
$run  
$cp -r FOAM_TUTORIALS/multiphase/interFoam/laminar/dambreak $FOAM_RUN/basic/ex4  
$cd basic/ex4  
$gedit 0/U
```

```
1  *-----* C++ *-----*  
2  |-----|  
3  | \ / | F i e l d | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox  
4  |  / \ | O p e r a t i o n | Version: 2.3.0  
5  |  / \ | A n d | Web: www.OpenFOAM.org  
6  |  / \ | M a n i p u l a t i o n |  
7  |-----|  
8  FoamFile  
9  {  
10     version      2.0;  
11     format       ascii;  
12     class        volVectorField;  
13     location     "0";  
14     object       U;  
15 }  
16 // *-----*  
17  
18 dimensions      [0 1 -1 0 0 0 0];  
19  
20 internalField   uniform (0 0 0);  
21  
22 boundaryField  
23 {  
24     fixedWalls  
25     {  
26         type      fixedValue;  
27         value     uniform (0 0 0);  
28     }  
29     atmosphere  
30     {  
31         type      pressureInletOutletVelocity;  
32         value     uniform (0 0 0);  
33     }  
34     defaultFaces  
35     {  
36         type      empty;  
37     }  
38 }  
39  
40  
41 // *-----*
```

0/U 유동속도 초기 값 및 경계 값 설정

- 속도의 차원 m/s [kg m s T kgmol A cd]
- 속도 초기 값은 전 영역에 uniform으로, 0 m/s



OpenFOAM으로 하는 첫 유동해석

예제 4. Bubble Rising (6)

```
$ run
$ cp -r FOAM_TUTORIALS/multiphase/interFoam/laminar/dambreak $FOAM_RUN/basic/ex4
$ cd basic/ex4
$ gedit constant/transportProperties
```

유동 물성치

```
1 .....: C++ .....
2
3 ..... Field ..... OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
4 ..... Operation ..... Version: 2.3.0
5 ..... And ..... Web: www.OpenFOAM.org
6 ..... Manipulation .....
7 .....
8 FoamFile
9 {
10 version 2.0;
11 format ascii;
12 class dictionary;
13 location "constant";
14 object transportProperties;
15 }
16 // *****
17
18 phases (water air);
19
20 water
21 {
22 transportModel Newtonian;
23 nu nu [ 0 2 -1 0 0 0 0 ] 1e-06;
24 rho rho [ 1 -3 0 0 0 0 0 ] 1000;
40 }
41
42 air
43 {
44 transportModel Newtonian;
45 nu nu [ 0 2 -1 0 0 0 0 ] 1.48e-05;
46 rho rho [ 1 -3 0 0 0 0 0 ] 1;
62 }
63
64 sigma sigma [ 1 0 -2 0 0 0 0 ] 0.07;
65
66
67 // *****
```

- water (alpha.water=1)
- 물에 대한 물성치 (점성, 밀도)
- air (alpha.water=0)
- 공기에 대한 물성치 (점성, 밀도)
- 표면장력



OpenFOAM으로 하는 첫 유동해석

예제 4. Bubble Rising (7)

```
$run  
$cp -r FOAM_TUTORIALS/multiphase/interFoam/laminar/dambreak $FOAM_RUN/basic/ex4  
$cd basic/ex4  
$gedit constant/g
```

```
1  *-----* C++ *-----*  
2  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |  
3  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |  
4  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |  
5  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |  
6  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |  
7  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |  
8  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |  
9  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |  
10 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |  
11 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |  
12 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |  
13 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |  
14 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |  
15 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |  
16 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |  
17 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |  
18 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |  
19 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |  
20 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |  
21 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |  
22 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
```

중력 설정

- 중력의 차원 m/s^2 [kg m s T kgmol A cd]
- 중력의 작용 방향 및 크기
- y 축으로 반대로 작용



OpenFOAM으로 하는 첫 유동해석

예제 4. Bubble Rising (8)

```
$run  
$cp -r FOAM_TUTORIALS/multiphase/interFoam/laminar/dambreak $FOAM_RUN/basic/ex4  
$cd basic/ex4  
$gedit system/controlDict
```

```
1  *-----* C++ *-----*  
2  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |  
3  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |  
4  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |  
5  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |  
6  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |  
7  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |  
8  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |  
9  |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |  
10 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |  
11 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |  
12 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |  
13 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |  
14 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |  
15 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |  
16 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |  
17 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |  
18 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |  
19 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |  
20 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |  
21 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |  
22 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |  
23 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |  
24 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |  
25 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |  
26 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |  
27 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |  
28 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |  
29 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |  
30 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |  
31 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |  
32 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |  
33 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |  
34 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |  
35 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |  
36 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |  
37 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |  
38 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |  
39 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |  
40 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |  
41 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |  
42 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |  
43 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |  
44 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |  
45 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |  
46 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |  
47 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |  
48 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |  
49 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |  
50 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |  
51 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |  
52 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |  
53 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |  
54 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |  
55 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |  
56 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
```

계산 설정

- 해석 솔버: interFoam
- 시작 시간: 0s, 종료 시간: 0.07s
- 시간간격: 0.0002s
- 파일출력 시간간격: 0.005s
- 파일출력 형식: ascii
- 파일출력 정확도: 소수점 6자리
- 시간출력 정확도: 소수점 6자리

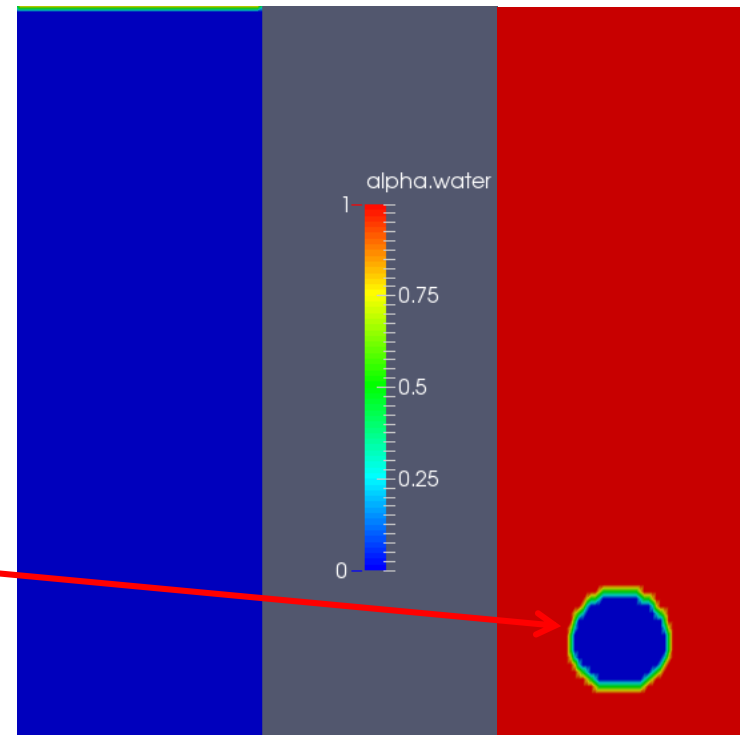


OpenFOAM으로 하는 첫 유동해석

- 예제 4. Bubble Rising (9)

```
$cp 0/alpha.water.org 0/alpha.water  
$paraFoam  
$gedit system/setFieldsDict  
$setFields  
$paraFoam
```

```
1  
2  
3  -----  
4  \      /  F i e l d      / OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox  
5  /      \  O p e r a t i o n  / Version: 2.3.0  
6  /      \  A n d      / Web: www.OpenFOAM.org  
7  \      /  M a n i p u l a t i o n  \  
8  -----  
9  FoamFile  
10 {  
11   version      2.0;  
12   format       ascii;  
13   class        dictionary;  
14   location     "system";  
15   object       setFieldsDict;  
16 }  
17 // *****  
18 defaultFieldValues  
19 (  
20   volScalarFieldValue alpha.water 1  
21 );  
22  
23 regions  
24 (  
25   cylinderToCell  
26   {  
27     p1 (0.0025 0.002 0);  
28     p2 (0.0025 0.002 0.001);  
29     radius 0.001;  
30     fieldValues  
31     (  
32       volScalarFieldValue alpha.water 0  
33     );  
34   }  
35 );  
36  
37  
38 // *****
```



Before setFields

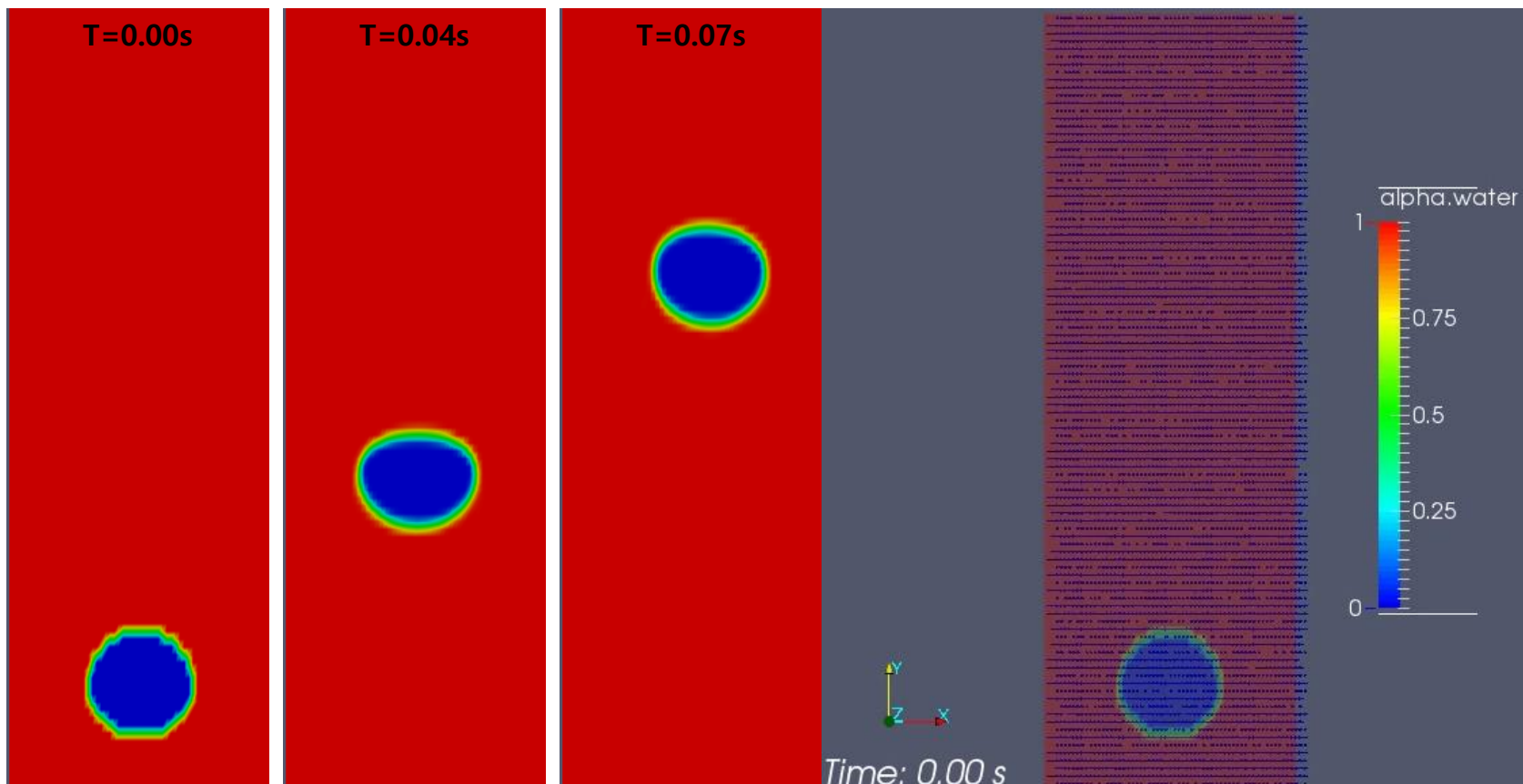
After setFields



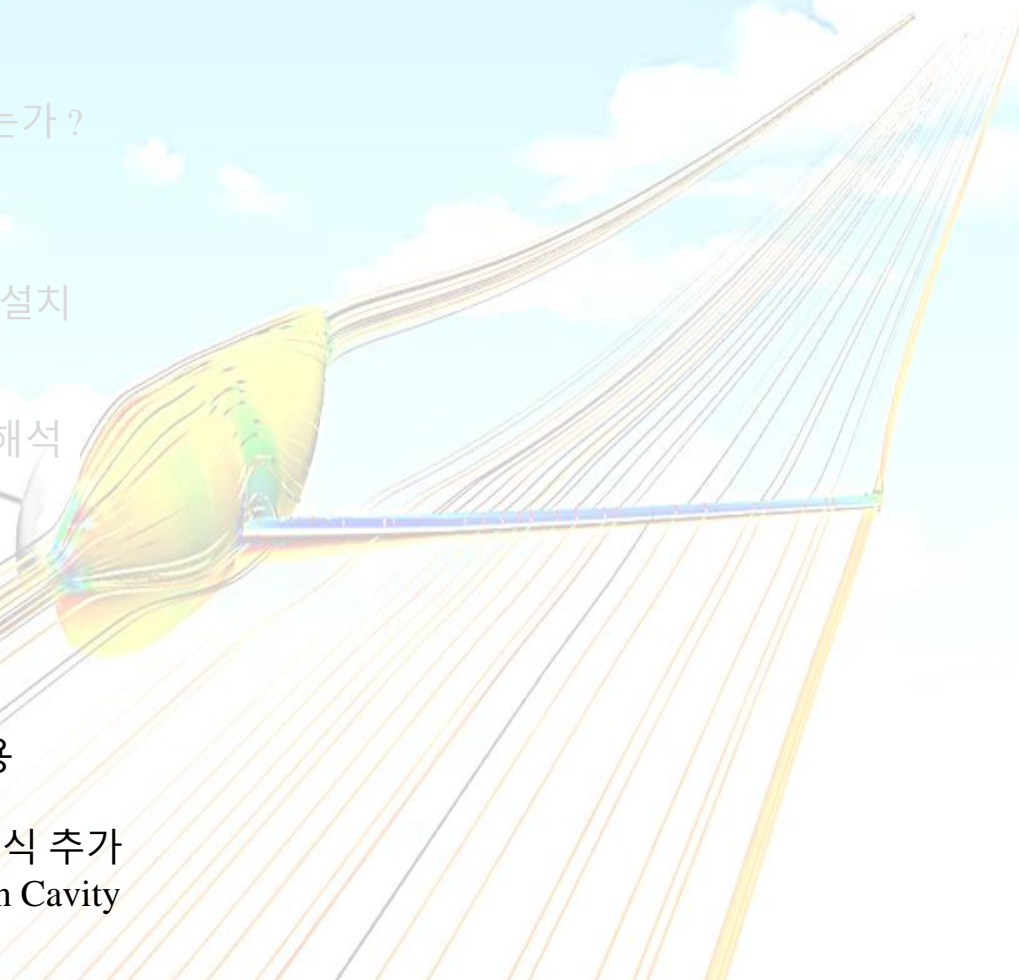
OpenFOAM으로 하는 첫 유동해석

- 예제 4. Bubble Rising (10)

\$interFoam
\$paraFoam



- OpenFOAM 첫 걸음 목표
- OpenFOAM 소개
 - OpenFOAM이란 무엇인가?
 - 방정식을 어떻게 적용하는가?
 - 유용한 도움말 및 설명서가 있는가?
- OpenFOAM 설치
 - Ubuntu 12.04 LTS 설치
 - Terminal에서 OpenFOAM 2.3.0 설치
 - SynapticPackManager에서 설치
- OpenFOAM으로 하는 첫 유동 해석
 - OpenFOAM의 일반적인 구조
 - 예제 1. Heat Transfer
 - 예제 2. Driven Cavity Flow
 - 예제 3. Poiseuille Flow
 - 예제 4. Bubble Rising (VOF)
- OpenFOAM에 방정식 추가 적용
 - Application의 일반적인 구조
 - 예제 5. icoFoam에 열 전달 방정식 추가
 - 예제 6. 열 전달이 포함된 Driven Cavity





OpenFOAM에 방정식 추가 적용

- OpenFOAM에서 소스 코드 찾는 방법 ?
 - 파일 매니저로 설치된 폴더에서 확인 가능
 - 한 개의 solver는 한 개의 프로그램
 - 열 전달 방정식 솔버는 laplacianFoam으로 해결됨
 - 어디에 OpenFOAM 솔버가 있는지 ?
 - `$cd $FOAM_APP/solvers`
 - `$ls`
 - 솔버는 기본, 열 전달, 연소, 비압축성, 압축성, 다상유동 등으로 분류 되어 있다.
 - 예를 들어 laplacianFoam을 찾아보면
 - `$cd basic/laplacianFoam`
 - `$ls`
 - `$gedit laplacianFoam.C`



OpenFOAM에 방정식 추가 적용

- LaplacianFoam.C

```
$run  
$cd $FOAM_APP/solvers/basic/laplacianFoam  
$gedit laplacianFoam.C
```

```
30 }  
31  
32 #include "fvCFD.H"  
33 #include "simpleControl.H"  
34  
35 // *****  
36  
37 int main(int argc, char *argv[])  
38 {  
39     #include "setRootCase.H"  
40  
41     #include "createTime.H"  
42     #include "createMesh.H"  
43     #include "createFields.H"  
44  
45     simpleControl simple(mesh);  
46  
47     // *****  
48  
49     Info<< "\nCalculating temperature distribution\n" << endl;  
50  
51     while (simple.loop())  
52     {  
53         Info<< "Time = " << runTime.timeName() << nl << endl;  
54  
55         while (simple.correctNonOrthogonal())  
56         {  
57             solve  
58             (  
59                 fvm::ddt(T) - fvm::laplacian(DT, T)  
60             );  
61         }  
62  
63         #include "write.H"  
64  
65         Info<< "ExecutionTime = " << runTime.elapsedCpuTime() << " s"  
66             << " ClockTime = " << runTime.elapsedClockTime() << " s"  
67             << nl << endl;  
68     }  
69  
70     Info<< "End\n" << endl;  
71  
72     return 0;  
73 }  
74
```

laplacianFoam.C

- OpenFOAM library
- Operator, 알고리즘, 입출력, 변수, 배열생성 등

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \text{laplacian}(D_T, T)$$

- fvm:: implicit 항
- fv:: explicit 항
- T와 DT는 createField.H에 작성



OpenFOAM에 방정식 추가 적용

- createFields.C

```
$run  
$cd $FOAM_APP/solvers/basic/laplacianFoam  
$gedit createFields.H
```

```
1 Info<< "Reading field T\n" << endl;  
2  
3 volScalarField T  
4 (  
5     IObject  
6     (  
7         "T",  
8         runTime.timeName(),  
9         mesh,  
10        IObject::MUST_READ,  
11        IObject::AUTO_WRITE  
12    ),  
13    mesh  
14 );  
15  
16 Info<< "Reading transportProperties\n" << endl;  
17  
18 IODictionary transportProperties  
19 (  
20     IObject  
21     (  
22         "transportProperties",  
23         runTime.constant(),  
24         mesh,  
25         IObject::MUST_READ_IF_MODIFIED,  
26         IObject::NO_WRITE  
27     )  
28 );  
29  
30  
31 Info<< "Reading diffusivity DT\n" << endl;  
32  
33 dimensionedScalar DT  
34 (  
35     transportProperties.lookup("DT")  
36 );  
37
```

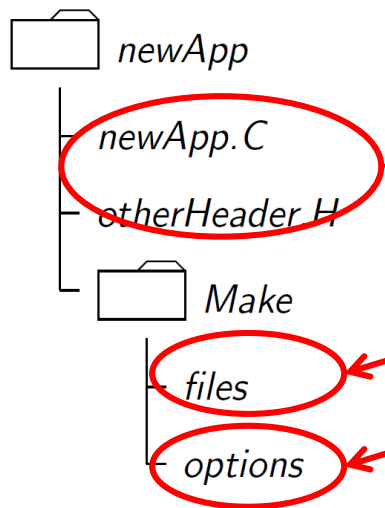
createFields.H

- 온도 T는 volScalarField의 객체로 선언
 - T는 스칼라
 - 초기 시간에 읽음 (0/T에 값들이 정의 되어함)
 - 각 시간 폴더에 저장 (runTime.timeName())
 - 경계조건을 포함
- 물성치는 constant/폴더에서 읽음
- DT는 transportProperties에 찾아옴



OpenFOAM에 방정식 추가 적용

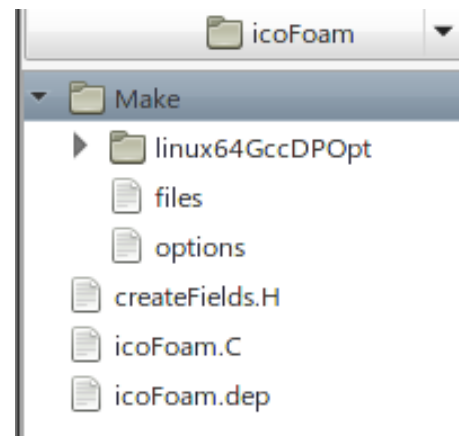
- Application의 일반적인 구조



- 소스 코드
- *.C 파일이 기본 파일
- 컴파일 파일 목록
- OpenFOAM에서 사용하는 응용프로그램 대한 라이브러리 링크

- icoFoam 솔버의 파일 구조

- `$ cd $FOAM_APP/solvers/incompressible/icoFoam`
- `$ ls`
- `$ gedit icoFoam.C`





OpenFOAM에 방정식 추가 적용

- 예제 5. icoFoam에 열 전달 방정식 추가 (1)
 - 비압축성 Navier-Stokes에 열 전달 방정식 결합한 솔버 개발

$$\rho U = 0$$

$$\rho \frac{dU}{dt} + \rho (U \cdot \nabla) U = -\nabla p + \rho (\nu \nabla^2 U)$$

$$\rho \frac{dT}{dt} + \rho (U \cdot \nabla) T = \rho (D_T T)$$

- 기존의 비압축성 Navier-Stokes에 수송방정식 추가
- icoFoam을 기본 솔버로 선택 여기에 열 전달 방정식 추가



OpenFOAM에 방정식 추가 적용

- 예제 5. icoFoam에 열 전달 방정식 추가 (2)
 - 사용자 OpenFOAM 홈에 applications폴더 만들기

```
$ cd $WM_PROJECT_USER_DIR  
$ mkdir -p applications/solvers/incompressible  
$ cd applications/solvers/incompressible
```

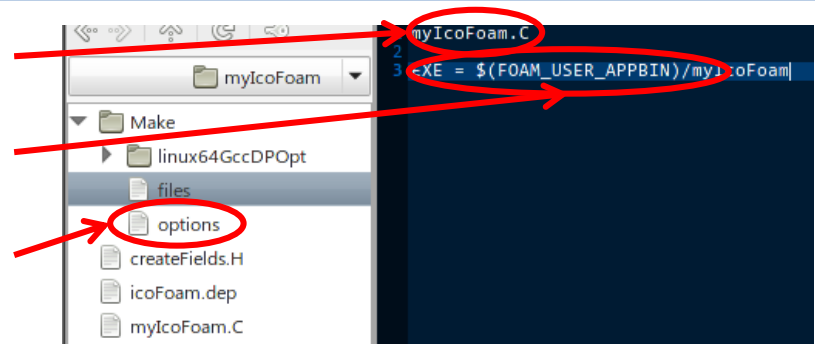
- icoFoam 솔버 복사 및 수정

```
$ cp -r $FOAM_APP/solvers/incompressible/icoFoam myIcoFoam  
$ cd myIcoFoam  
$ mv icoFoam.C myIcoFoam.C  
$ gedit Make/files
```

컴파일 할 파일 이름

실행파일은 사용자 폴더에 저장

OpenFOAM 라이브러리 링크



- myIcoFoam 컴파일

```
$ wclean  
$ wmake
```




OpenFOAM에 방정식 추가 적용

- 예제 5. icoFoam에 열 전달 방정식 추가 (3)

```
$ cd myIcoFoam  
$ gedit createFields.H
```

```
3   IODictionary transportProperties  
4   (  
5       IObject  
6       (  
7           "transportProperties",  
8           runtime.constant(),  
9           mesh,  
10          IObject::MUST_READ_IF_MODIFIED,  
11          IObject::NO_WRITE  
12      )  
13  );  
14  dimensionedScalar nu  
15  (  
16      transportProperties.lookup("nu")  
17  );  
18  dimensionedScalar DT  
19  (  
20      transportProperties.lookup("DT")  
21  );  
22  Info<< "Reading field T\n" << endl;  
23  volScalarField T  
24  (  
25      IObject  
26      (  
27          "T",  
28          runtime.timeName(),  
29          mesh,  
30          IObject::MUST_READ,  
31          IObject::AUTO_WRITE  
32      )  
33  );  
34  mesh
```

createFields.H 수정

- DT 스칼라 선언하고 transportProperties에 찾아옴
- 온도 T는 volScalarField의 객체로 선언
 - 초기 시간에 읽음 (0/T에 값들이 정의 되어함)
 - 각 시간 폴더에 저장 (runtime.timeName())
 - 경계조건을 포함



OpenFOAM에 방정식 추가 적용

예제 5. icoFoam에 열 전달 방정식 추가 (4)

```
$ cd myIcoFoam
$ gedit myIcoFoam.C
$ wmake
```

```

81
82     for (int nonOrth=0; nonOrth<=nNonOrthCorr; nonOrth++)
83     {
84         fvScalarMatrix pEqn
85         (
86             fvm::laplacian(rAU, p) == fvc::div(phiHbyA)
87         );
88         pEqn.setReference(pRefCell, pRefValue);
89         pEqn.solve();
90
91         if (nonOrth == nNonOrthCorr)
92         {
93             phi = phiHbyA - pEqn.flux();
94         }
95     }
96
97     #include "continuityErrs.H"
98
99     U = HbyA - rAU*fvc::grad(p);
100    U.correctBoundaryConditions();
101
102 }
103
104
105 fvScalarMatrix TEqn
106 (
107     fvm::ddt(T)
108     + fvm::div(phi, T)
109     - fvm::laplacian(DT, T)
110 );
111
112 TEqn.solve();
113

```

myIcoFoam.C 수정

- icoFoam은 PISO 알고리즘으로 Navier-Stokes 방정식을 계산

$$\rho \mathbf{U} = 0$$

$$\rho \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \rho (\mathbf{U} \cdot \nabla) \mathbf{U} = -\nabla p - \rho (\mathbf{n} \cdot \nabla) \mathbf{U}$$

- phi는 셀 면에서의 flux 속도

- 압력 속도 곱합을 계산한 후 열 전달 방정식 계산

$$\rho \frac{\partial T}{\partial t} + \rho (\mathbf{U} \cdot \nabla) T = \nabla \cdot (D_T \nabla T)$$

- TEqn을 매트릭스로 인코딩

OpenFOAM에 방정식 추가 적용

- 예제 6. 열 전달이 포함된 Driven Cavity Flow (1)

- Driven Cavity에 열 전달 해석

- 비압축성 Navier-Stokes과 열 전달 방정식

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = 0$$

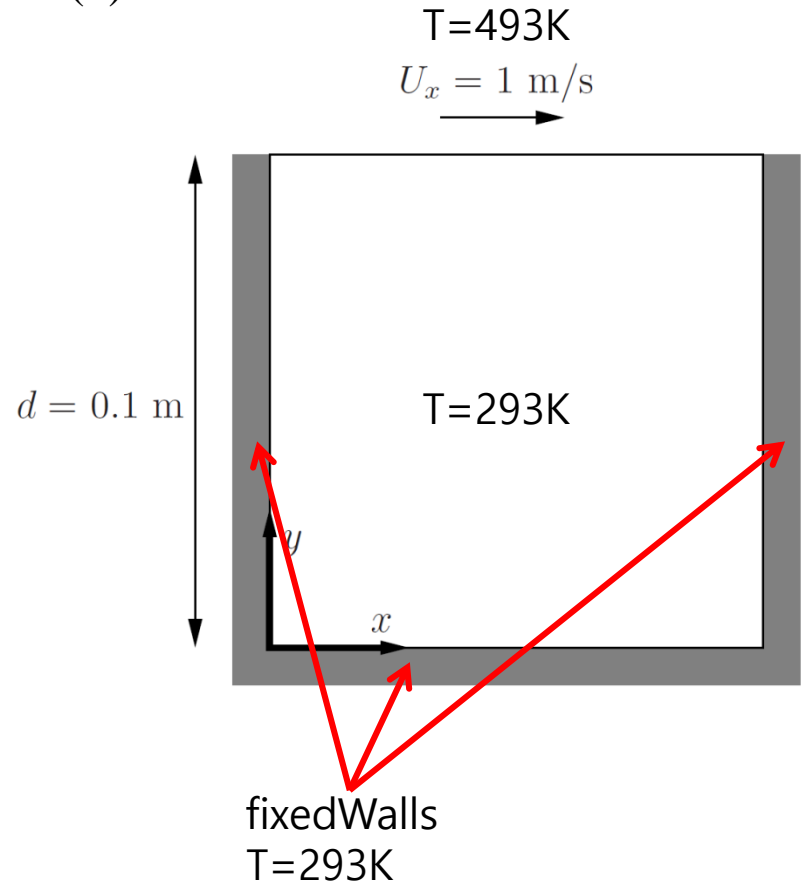
$$\rho \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \rho (\mathbf{U} \cdot \nabla) \mathbf{U} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{U}$$

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_p (\mathbf{U} \cdot \nabla) T = \nabla \cdot (k \nabla T)$$

- 솔버는 myIcoFoam 사용

- 후처리

- paraFoam 사용





OpenFOAM에 방정식 추가 적용

예제 6. 열 전달이 포함된 Driven Cavity Flow (2)

```
$ run
$ cp -r basic/ex2 basic/ex6
$ cd basic/ex6
$ rm -r 1* 2* 3* 4* 5* 6* 7* 8* 9*
$ cp 0/p 0/T
$ gedit 0/T
```

```
3 Field      OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
4 Operation  Version: 2.3.0
5 And        Web: www.OpenFOAM.org
6 Manipulation
7
8 FoamFile
9 {
10  version      2.0;
11  format       ascii;
12  class        volScalarField;
13  object       T;
14 }
15 // *****
16
17 dimensions   [0 0 0 1 0 0 0];
18
19 internalField uniform 293;
20
21 boundaryField
22 {
23   movingWall
24   {
25     type      fixedValue;
26     value     uniform 493;
27   }
28   fixedWalls
29   {
30     type      fixedValue;
31     value     uniform 293;
32   }
33
34   frontAndBack
35   {
36     type      empty;
37   }
38 }
39
40
41 // *****
```

0/T 온도 초기 값 및 경계 값 설정

- 온도의 차원 K [kg m s T kgmol A cd]
- 온도 초기 값은 전영역에 uniform으로, T=293K
- 고정 벽은 uniform으로, T=293K
- 움직이는 벽은 uniform으로, T=493K



OpenFOAM에 방정식 추가 적용

- 예제 6. 열 전달이 포함된 Driven Cavity Flow (3)

```
$ gedit constant/transportProperties
```

```
1  *----- C++ -----*
2
3  \-----/
4  | Field      | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
5  | Operation  | Version: 2.3.0
6  | And        | Web: www.OpenFOAM.org
7  | Manipulation|
8  *-----*
9  FoamFile
10 {
11   version      2.0;
12   format       ascii;
13   class        dictionary;
14   location     "constant";
15   object       transportProperties;
16 }
17 // *****
18 nu            nu [ 0 2 -1 0 0 0 ] 0.01;
19
20 DT            DT [ 0 2 -1 0 0 0 ] 1e-4;
21
22 // *****
23
```

유동 물성치 설정

- 열 확산 계수 차원 설정 [kg m s T kgmol A cd]
- 계수 값 설정, $DT=4 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$



OpenFOAM에 방정식 추가 적용

- 예제 6. 열 전달이 포함된 Driven Cavity Flow (4)

```
$ gedit system/fvSolution
```

```
1  =====
2  \      /  F i e l d      / OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
3  /      \  O peration    / Version: 2.3.0
4  \      /  A n d         / Web: www.OpenFOAM.org
5  /      \  M anipulation /
6  =====
7  *
8  FoamFile
9  {
10     version      2.0;
11     format        ascii;
12     class         dictionary;
13     location      "system";
14     object        fvSolution;
15 }
16 // *****
17
18 solvers
19 {
20     p
21     {
22         solver      PCG;
23         preconditioner DIC;
24         tolerance   1e-06;
25         relTol      0;
26     }
27
28     T
29     {
30         solver      PBiCG;
31         preconditioner DILU;
32         tolerance   1e-06;
33         relTol      0;
34     }
35
36     U
37     {
38         solver      smoothSolver;
39         smoother    symGaussSeidel;
40         tolerance   1e-05;
41         relTol      0;
42     }
43 }
44
```

System/fvSolution 수정

- 온도 T에 대한 선형해석 기법 설정



OpenFOAM에 방정식 추가 적용

- 예제 6. 열 전달이 포함된 Driven Cavity Flow (5)

```
$ gedit system/fvSchemes
```

```
1  *-----* C++ *-----*
2  |
3  |-----|
4  | \      | Field      | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
5  |  \     | Operation  | Version: 2.3.0
6  |   \    | And        | Web: www.OpenFOAM.org
7  |----| Manipulation |
8  |
9  |-----|
10 | FoamFile
11 | {
12 |   version      2.0;
13 |   format       ascii;
14 |   class        dictionary;
15 |   location     "system";
16 |   object       fvSchemes;
17 | }
18 |
19 |-----|
20 | ddtSchemes
21 | {
22 |   default      Euler;
23 | }
24 |
25 |-----|
26 | gradSchemes
27 | {
28 |   default      Gauss linear;
29 |   grad(p)      Gauss linear;
30 | }
31 |
32 |-----|
33 | divSchemes
34 | {
35 |   default      none;
36 |   div(phi,U)   Gauss linear;
37 |   div(phi,T)   Gauss linear;
38 | }
39 |
40 |-----|
41 | laplacianSchemes
42 | {
43 |   default      Gauss linear orthogonal;
44 |   laplacian(DT,T) Gauss linear orthogonal;
45 | }
46 |
47 |-----|
48 | interpolationSchemes
49 | {
50 |   default      linear;
51 | }
52 | }
```

System/fvSchemes 수정

- 열 전달 방정식의 이산화 기법 설정



OpenFOAM에 방정식 추가 적용

- 예제 6. 열 전달이 포함된 Driven Cavity Flow (6)

```
$ gedit system/controlDict
```

```
1  // *****
2  // *****
3  // *****
4  // *****
5  // *****
6  // *****
7  // *****
8  FoamFile
9  {
10     version      2.8;
11     format       ascii;
12     class        dictionary;
13     location     "system";
14     object       controlDict;
15 }
16 // *****
17 // *****
18 application    icoFoam;
19 startFrom      startTime;
20 startFrom
21 startFrom
22 startTime     0;
23
24 stopAt        endTime;
25 stopAt
26 stopAt
27 endTime       10;
28 deltaT        0.005;
29
30 writeControl   timeStep;
31 writeControl
32 writeControl
33 writeInterval  20;
34 purgeWrite    0;
35
36 writeFormat   ascii;
37
38 writePrecision 6;
39
40 writeCompression off;
41
42 timeFormat    general;
43
44 timePrecision 6;
45
46 runtimeModifiable true;
47
48 // *****
49 // *****
```

System/controlDict 수정

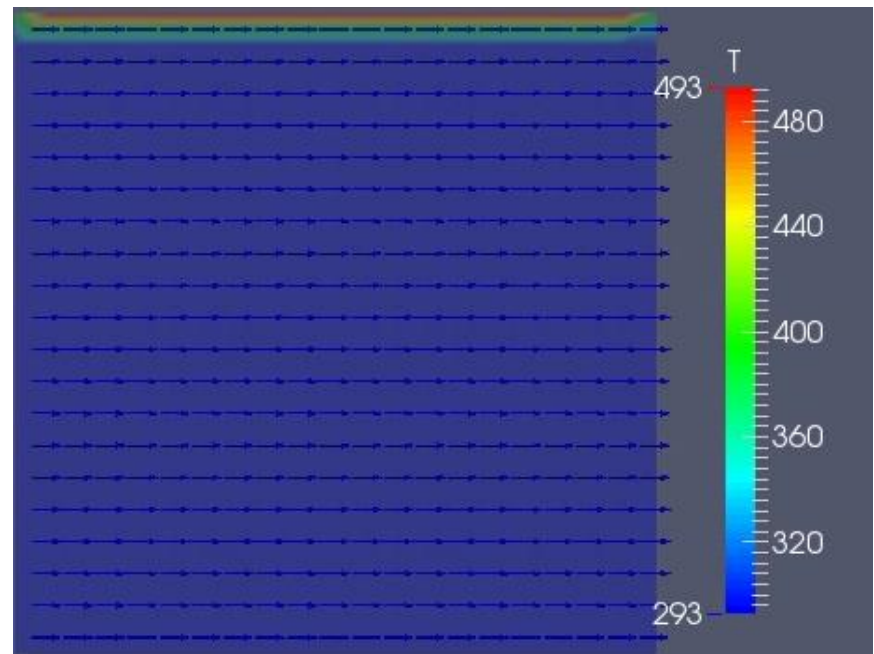
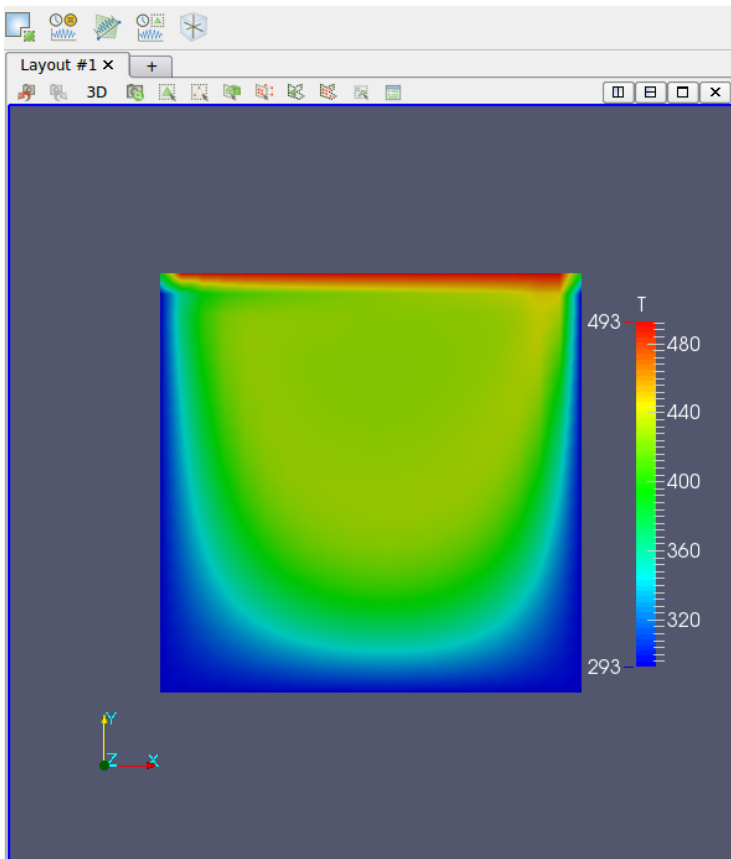
- 해석시간 10s로 수정해서 길게 해석함



OpenFOAM에 방정식 추가 적용

- 예제 6. 열 전달이 포함된 Driven Cavity Flow (5)

```
$ mylcoFoam  
$ paraFoam
```





Thank you for your attention

본 기본교육 자료 (pdf와 해석파일) 는 OKUCC (행사가 끝나고 차후 업로드) 또는 www.nextfoam.co.kr 자료실에 있습니다.