

오픈폼(OpenFOAM) 소개 자료

Next E&S, 2010.9.

오픈폼(OpenFOAM)이란?

오픈폼(OpenFOAM : Open Field Operation and Manipulation)은 소스 코드가 공개된 무료 전산유체역학(CFD : Computational Fluid Dynamics) 해석을 위한 프로그램입니다.

이 프로그램은 OpenCFD Ltd. 에서 개발되었으며 GNU GPL(일반 공중 사용 허가서 : General Public License)를 사용하기 때문에 누구나 무료로 다운로드 받아 사용할 수 있으며 전 세계의 많은 연구자들에 의해 계속 개발되고 있습니다.

오픈폼은 1993년에 FOAM이라는 이름으로 개발이 시작되었습니다. 영국의 Imperial College에서 Henry Weller 박사와 Hrvoje Jasak 박사가 개발을 시작하였으며 2004년 겨울에 OpenFOAM 1.0 이 공개 코드로 발표 되었습니다. 이후 계속 업그레이드가 진행되어 2010년 현재 최신 버전은 OpenFOAM 1.7입니다.

오픈폼의 장점

최근 컴퓨터 및 수치해석 기법의 발달로 R&D 및 설계 과정에서 전산유체역학은 제품의 최적설계, 공정 최적화 등에서 열 및 유체의 이동현상에 관한 연구 방법으로 확고한 자리를 차지하고 있습니다. 전산유체역학은 많은 분야에서 실험적 접근 방법을 대체하고 있습니다. 전산유체역학의 도구로 국내 대부분의 산업체, 학교, 연구소에서는 외국의 상용 소프트웨어를 사용하고 있습니다. 이들 상용소프트웨어의 높은 가격은 전산유체역학이라는 유용한 도구를 사용한 연구개발의 확장을 가로 막고 있습니다. 특히 최근 멀티코어 CPU의 발달과 컴퓨터 가격의 하락으로 병렬연산이 일반화 되고 있으나 CPU core수에 따라 사용료가 책정되는 정책은 효율적인 연구개발에 장애가 되고 있습니다. 상용 소프트웨어 라이선스 비용의 일부를 고성능 컴퓨터에 투자하고 소프트웨어는 공개 프로그램인 오픈폼을 사용한다면 지금까지의 연구방식 패러다임을 완전히 바꿀 수 있을 것입니다.

또한 상용 소프트웨어의 닫힌 구조는 이들 프로그램이 갖고 있지 못한 기능을 사용자가 추가하기가 힘들기 때문에 연구개발의 범위가 상용 프로그램의 기능 안으로 축소될 수 밖에 없습니다. 상용 소프트웨어들이 사용자 정의 함수 등의 형태로 제한된 접근을 허용하고 있으나 C 언어나 Fortran 과 같은 일반적인 언어가 아닌 각 프로그램 고유의 언어를 사용해야 하기 때문에 기능의 추가는 매우 어렵습니다. 그러나 공개 프로그램인 오픈폼은 C 언어를 이용하여 어떤 기능이든 추가할 수 있습니다. 그리고 세계의 많은 연구자들이 개발에 참여하고 있기 때문에 코드의 발달 속도가 매우 빠릅니다.

특징

오픈폼은 어플리케이션(application) 이라고 칭하는 실행파일을 만들기 위한 C++ 라이브러리들의 모음입니다. 이 C++ 라이브러리들을 이용해서 사용자가 자신이 원하는 프로그램(솔버, solver)을 만들 수 있습니다. 이 라이브러리들은 우리가 해석하고자 하는 편미분 방정식과 최대한 유사하게 만들어져 있어 지배방정식을 잘 이해하고 있다면 C++ 언어에 대해 자세히 알지 못하더라도 쉽게 프로그램을 만들 수 있습니다.

예를 들어 아래와 같은 편미분 방정식을 계산한다면

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

솔버 프로그램은 다음과 같습니다.

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

오픈폼은 C++ 라이브러리들의 소스 파일 뿐 아니라 미리 컴파일 된 많은 어플리케이션들을 함께 제공합니다. 이 어플리케이션은 솔버(solver)와 유틸리티(utility)로 구분됩니다.

오픈폼에서 제공 되는 표준 솔버(standard solver)들은 특정 문제에 맞게 만들어져 있으며 비압축성유동, 압축성유동, 화학반응, 다상유동, 구조해석, 전자기장해석, 분자동역학해석 등의 분야에 60여 개의 표준 솔버가 있습니다. 이들 솔버는 비정렬격자 기반으로 만들어져 있습니다. 유틸리티는 전/후처리 작업, 데이터 파일 관리, 병렬연산, 격자 운동 등을 위한 어플리케이션입니다.

오픈폼의 기능들

■ 표준 솔버

➤ 'Basic' CFD codes

- laplacianFoam
 - Solves a simple Laplace equation, e.g. for thermal diffusion in a solid
- potentialFoam
 - Simple potential flow solver which can be used to generate starting fields for full Navier-Stokes codes
- scalarTransportFoam

- Solves a transport equation for a passive scalar
- *Incompressible flow*
 - boundaryFoam
 - Steady-state solver for 1D turbulent flow, typically to generate boundary layer conditions at an inlet, for use in a simulation
 - channelFoam
 - Incompressible LES solver for flow in a channel
 - icoFoam
 - Transient solver for incompressible, laminar flow of Newtonian fluids
 - nonNewtonianIcoFoam
 - Transient solver for incompressible, laminar flow of non-Newtonian fluids
 - pimpleDyMFoam
 - Transient solver for incompressible, flow of Newtonian fluids on a moving mesh using the PIMPLE (merged PISOSIMPLE) algorithm
 - pimpleFoam
 - Large time-step transient solver for incompressible, flow using the PIMPLE (merged PISO-SIMPLE) algorithm
 - pisoFoam
 - Transient solver for incompressible flow
 - porousSimpleFoam
 - Steady-state solver for incompressible, turbulent flow with implicit or explicit porosity treatment
 - shallowWaterFoam
 - Transient solver for inviscid shallow-water equations with rotation
 - simpleFoam
 - Steady-state solver for incompressible, turbulent flow
- *Compressible flow*
 - rhoCentralFoam
 - Density-based compressible flow solver based on centralupwind schemes of Kurganov and Tadmor
 - rhoPimpleFoam
 - Transient solver for laminar or turbulent flow of compressible fluids for HVAC and similar applications
 - rhoPisoFoam
 - Transient PISO solver for compressible, laminar or turbulent flow
 - rhoPorousMRFPimpleFoam
 - Transient solver for laminar or turbulent flow of compressible fluids with support for porous media and MRF for HVAC and similar applications
 - rhoPorousSimpleFoam

- Steady-state solver for turbulent flow of compressible fluids with RANS turbulence modeling, and implicit or explicit porosity treatment
- rhoSimpleFoam
 - Steady-state SIMPLE solver for laminar or turbulent RANS flow of compressible fluids
- sonicDyMFoam
 - Transient solver for trans-sonic/supersonic, laminar or turbulent flow of a compressible gas with mesh motion
- sonicFoam
 - Transient solver for trans-sonic/supersonic, laminar or turbulent flow of a compressible gas
- sonicLiquidFoam
 - Transient solver for trans-sonic/supersonic, laminar flow of a compressible liquid

➤ *Multiphase flow*

- bubbleFoam
 - Solver for a system of 2 incompressible fluid phases with one phase dispersed, e.g. gas bubbles in a liquid
- cavitatingFoam
 - Transient cavitation code based on the homogeneous equilibrium model from which the compressibility of the liquid/vapor "mixture" is obtained
- compressibleInterFoam
 - Solver for 2 compressible, isothermal immiscible fluids using a VOF (volume of fluid) phase-fraction based interface capturing approach
- interFoam
 - Solver for 2 incompressible, isothermal immiscible fluids using a VOF (volume of fluid) phase-fraction based interface capturing approach
- interMixingFoam
 - Solver for 3 incompressible fluids, two of which are miscible, using a VOF method to capture the interface
- interPhaseChangeFoam
 - Solver for 2 incompressible, isothermal immiscible fluids with phase-change (e.g. cavitation). Uses a VOF (volume of fluid) phase-fraction based interface capturing approach
- multiphaseInterFoam
 - Solver for n incompressible fluids which captures the interfaces and includes surface-tension and contact-angle effects for each phase
- settlingFoam
 - Solver for 2 incompressible fluids for simulating the settling of the dispersed phase

- twoLiquidMixingFoam
 - Solver for mixing 2 incompressible fluids
- twoPhaseEulerFoam
 - Solver for a system of 2 incompressible fluid phases with one phase dispersed, e.g. gas bubbles in a liquid
- *Direct numerical simulation (DNS)*
 - dnsFoam
 - Direct numerical simulation solver for boxes of isotropic turbulence
- *Combustion*
 - coldEngineFoam
 - Solver for cold-flow in internal combustion engines
 - dieselEngineFoam
 - Solver for diesel engine spray and combustion
 - dieselFoam
 - Solver for diesel spray and combustion
 - engineFoam
 - Solver for internal combustion engines
 - fireFoam
 - Transient Solver for Fires and turbulent diffusion flames
 - PDRFoam
 - Solver for compressible premixed/partially-premixed combustion with turbulence modelling
 - reactingFoam
 - Solver for combustion with chemical reactions
 - rhoReactingFoam
 - Solver for combustion with chemical reactions using density based thermodynamics package
 - XiFoam
 - Solver for compressible premixed/partially-premixed combustion with turbulence modeling
- *Heat transfer and buoyancy-driven flows*
 - buoyantBoussinesqPimpleFoam
 - Transient solver for buoyant, turbulent flow of incompressible fluids
 - buoyantBoussinesqSimpleFoam
 - Steady-state solver for buoyant, turbulent flow of incompressible fluids
 - buoyantPimpleFoam
 - Transient solver for buoyant, turbulent flow of compressible fluids for ventilation and heat-transfer
 - buoyantSimpleFoam

- Steady-state solver for buoyant, turbulent flow of compressible fluids
- buoyantSimpleRadiationFoam
 - Steady-state solver for buoyant, turbulent flow of compressible fluids, including radiation, for ventilation and heat-transfer
- chtMultiRegionFoam
 - Combination of heatConductionFoam and buoyantFoam for conjugate heat transfer between a solid region and fluid region
- chtMultiRegionSimpleFoam
 - Steady-state version of chtMultiRegionFoam
- *Particle-tracking flows*
 - coalChemistryFoam
 - Transient solver for: - compressible, - turbulent flow, with -coal and limestone parcel injections, - energy source, and -combustion
 - porousExplicitSourceReactingParcelFoam
 - Transient PISO solver for compressible, laminar or turbulent flow with reacting multiphase Lagrangian parcels for porous media, including explicit sources for mass, momentum and energy
 - reactingParcelFoam
 - Transient PISO solver for compressible, laminar or turbulent flow with reacting Lagrangian parcels
 - uncoupledKinematicParcelFoam
 - Transient solver for the passive transport of a single kinematic particle could Molecular dynamics methods
 - mdEquilibrationFoam
 - Equilibrates and/or preconditions molecular dynamics systems
 - mdFoam
 - Molecular dynamics solver for fluid dynamics
- *Direct simulation Monte Carlo methods*
 - dsmcFoam
 - Direct simulation Monte Carlo (DSMC) solver for 3D, transient, multi- species flows
- *Electromagnetics*
 - electrostaticFoam
 - Solver for electrostatics
 - mhdFoam
 - Solver for magneto hydro dynamics (MHD): incompressible, laminar flow of a conducting fluid under the influence of a magnetic field
- *Stress analysis of solids*
 - solidDisplacementFoam

- Transient segregated finite-volume solver of linear-elastic, small-strain deformation of a solid body, with optional thermal diffusion and thermal stresses
- solidEquilibriumDisplacementFoam
 - Steady-state segregated finite-volume solver of linear-elastic, small-strain deformation of a solid body, with optional thermal diffusion and thermal stresses
- *Finance*
 - financialFoam
 - Solves the Black-Scholes equation to price commodities
- 병렬계산
 - OpenFoam은 계산 용량의 대형화 추세에 맞춰 병렬 계산 기능을 가지고 있습니다. OpenFoam의 utility를 이용해 해석에 참가하는 core의 개수대로 해석 영역을 자동으로 분할하고 MPI를 이용하여 계산이 가능 합니다.

전/후처리 과정

오픈폼은 격자 생성을 위해 blockMesh와 snappyHexMesh라는 유틸리티를 제공합니다. blockMesh는 사용자가 격자의 좌표를 입력하여 격자를 만드는 방법으로 산업현장의 복잡한 형상을 구현하기에는 한계가 있습니다. snappyHexMesh는 stl 파일을 이용하여 육면체 격자를 생성하고 경계면에서는 면의 형상에 따라 격자를 잘라주어 다면체 격자를 생성합니다. 이 방법을 사용하면 어떤 복잡한 형상도 양질의 격자를 생성할 수 있습니다.

다른 전처리 프로그램에서 만들어진 격자를 사용할 수 있도록 데이터 변환 유틸리티들을 제공합니다. StarCD, Fluent, CFX 등 다양한 상용 프로그램의 격자를 사용할 수 있으며 plot3d 양식의 파일을 사용할 수 있습니다. 최근 Harpoon, GridGen 등 전문 전처리 프로그램들은 오픈폼 형식으로 격자를 내보내는 옵션을 갖고 있어 별도의 데이터변환 유틸리티를 사용할 필요가 없습니다.

후처리 프로그램인 paraview가 내장되어 있어 계산결과를 확인하고 데이터를 추출할 수 있습니다. 전문 후처리 프로그램인 Fieldview, Ensight 등의 프로그램에서 읽을 수 있는 데이터 형식으로 변환시키는 유틸리티를 제공하고 있으며 StarCD, Fluent 등의 프로그램 데이터 파일 형식으로도 변환할 수 있습니다.

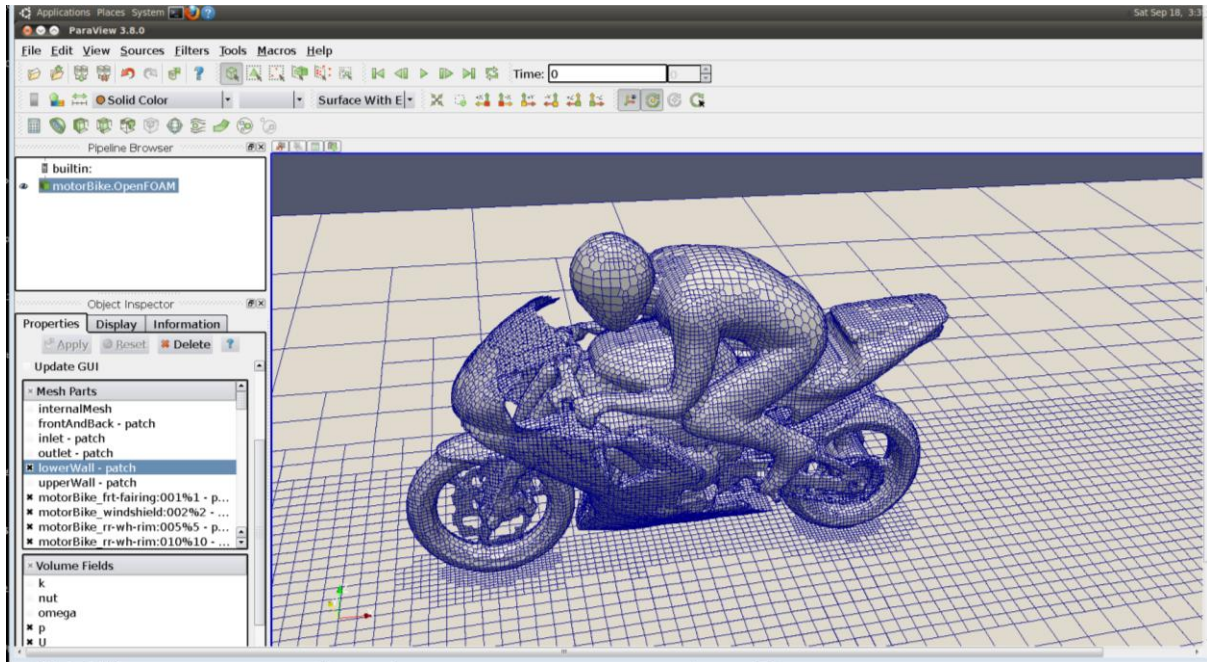


그림 1. paraview GUI 환경 및 snappyHexMesh를 이용한 격자 예

관련 웹 사이트

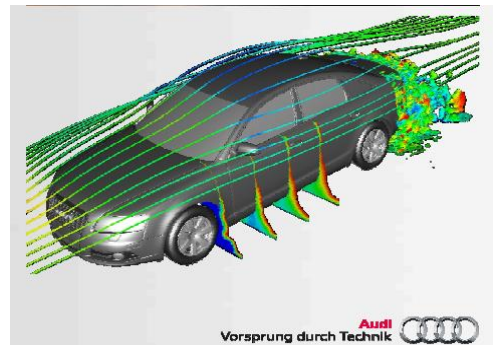
- <http://www.openfoam.com/>
- <http://foamcfd.org/>
- http://openfoamwiki.net/index.php/Main_Page
- <http://wikki.gridcore.se/>

적용 사례

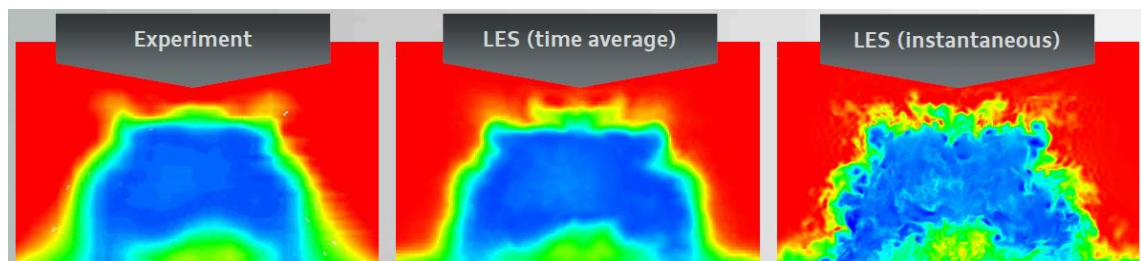
- Automotive Aerodynamics - Audi

- Dr. Moni Islam, Audi Wind-Tunnel Center
- 2009 Open Source CFD International Conference, Barcelona 발표 자료
- <http://www.opensourcecfcd.com/conference2009/>
- 대상 차종 : Audi A6
- 격자 수 : 47,000,000 cell
- CPU core : 192
- 격자 생성
 - 오픈폼의 snappyHexMesh 사용
 - 2.5 시간 소요
- 계산 시간 : 1.5초 계산에 25시간
- Validation
 - Drag Coefficient

	c_D [-]	c_{L_f} [-]	c_{L_r} [-]
Experiment	0.271	0.068	0.116
Simulation	0.277	0.066	0.122



- C_{pt} wake



- Oil streak

