

# 2022 KSIAM-NIMS School on CFD

## 유한체적법 기반 공개 소프트웨어 OpenFOAM(BARAM)과 무격자 기반 CFD 프로그램(FAMUS)의 소개

2022. 5. 13.

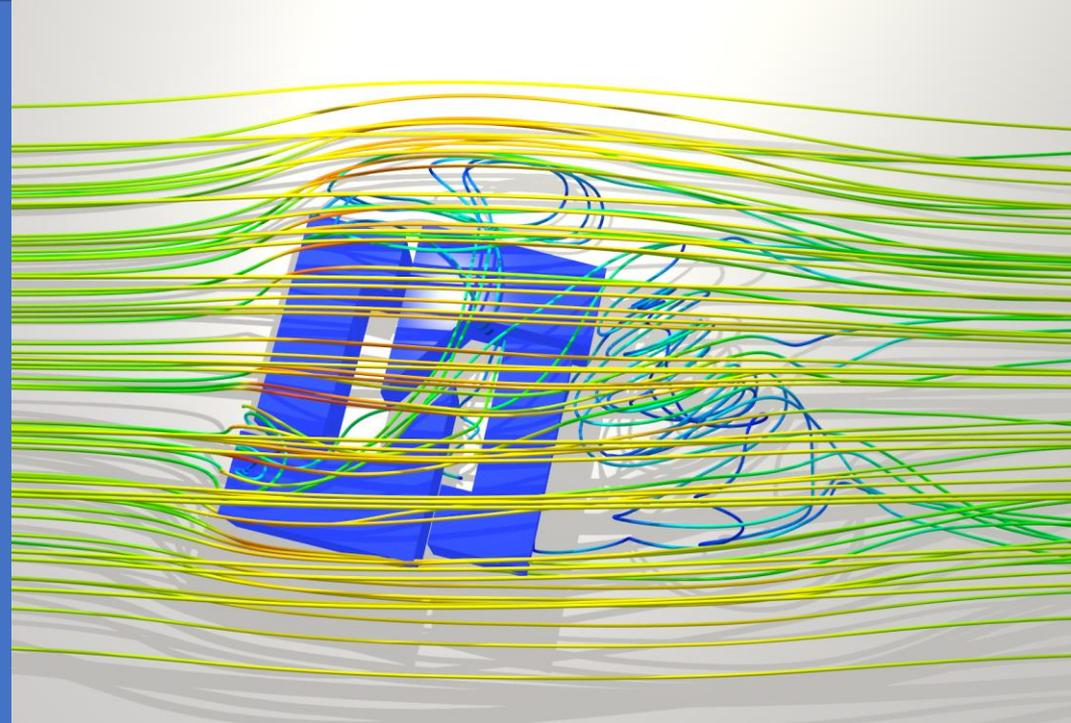
# NEXTfoam

## Open source CFD BARAM

- Open source software
- OpenFOAM
- BARAM
- Validation & applications

## Meshless CFD FAMUS

- FAMUS S/W
- 무격자 기법
- FAMUS 구성 및 기능
- Validation
- 연구개발 사항



## • 기업 일반 개요

기업명	<ul style="list-style-type: none"><li>• (주)넥스트폼</li><li>• NEXTfoam CO.,LTD.</li></ul>	
설립	<ul style="list-style-type: none"><li>• 2011년 01월 03일</li></ul>	
대표자	<ul style="list-style-type: none"><li>• 김병윤</li></ul>	
위치	<ul style="list-style-type: none"><li>• 서울특별시 금천구 디지털로9길 32, A동 1102, 1106호</li></ul>	
구성원	<ul style="list-style-type: none"><li>• 공학박사 : 4 명</li><li>• 공학석사 : 16 명</li><li>• 공학사 : 1 명</li><li>• 경력학사 : 1 명</li></ul>	
주요사업	<ul style="list-style-type: none"><li>• 전산유체역학 (CFD) 해석 SW 개발</li><li>• CFD 해석 및 엔지니어링 컨설팅</li><li>• 영상 계측 기반 솔루션 제공 및 컨설팅</li></ul>	
홈페이지/연락처	<ul style="list-style-type: none"><li>• <a href="http://www.nextfoam.co.kr">www.nextfoam.co.kr</a></li><li>• +82-70-8796-3019</li></ul>	

## • 주요 사업 분야

### OpenFOAM

- **Open Field Operation And Manipulation**
- **Open Source** CFD Tool Box
- 벡터/스칼라 장의 미적분 지배방정식 계산을 위한 C++ 소스코드/라이브러리
- 다양한 물리 현상 **해석 / 컨설팅 사용자 맞춤 프로그램** (BARAM, ESPER)
- 커뮤니티활동 (OKUCC)
- **클라우드 활용 기술 지원**

### FAMUS Meshless CFD

- **Fully Automated Multi-physics Simulator**
- **무격자 기법 기반 상용 CFD 해석 프로그램**
- **대변형 해석 / 다중물체 중첩 해석 용이**
- 초음속/극초음속 영역의 정확한 해석 가능
- ADD의 무격자 기술이전으로 개발
- FAMUS 해석 솔버 기반 **사용자 맞춤 프로그램 개발**

### 영상측량

- **광학식 카메라를 이용** 물체의 3차원 위치/자세 측정
- **영상측량 + 상태추정 필터링 결합**
- **6자유도 운동 (자세, 속도, 가속도) 분석**
- 단안카메라를 이용 효율적 계측 가능
- **고비용, 고위험 계측 대체**  
항공기 외장 분리 계측  
건축물 안전성 평가

OpenFOAM The OpenFOAM Foundation

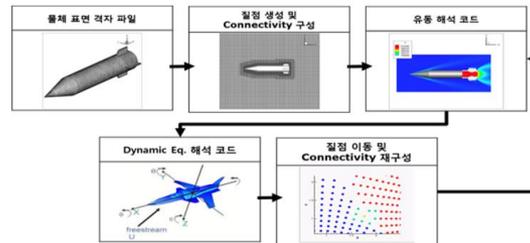
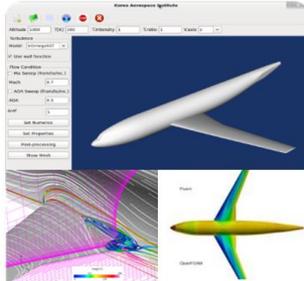


Welcome to the Extend-Project  
Community-driven Releases of OpenFOAM®

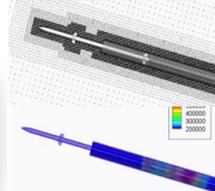
The goal of the Extend-Project is to open the OpenFOAM® CFD toolbox to community contributed extensions in the spirit of the OpenSource development model.

OpenFOAM Source & Library

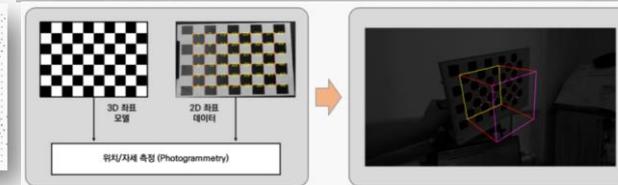
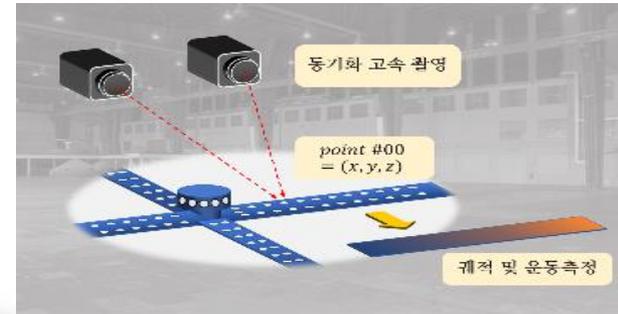
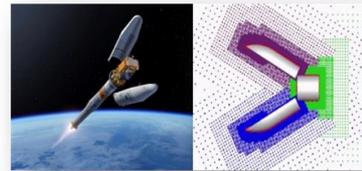
- Mesh generation & manipulation
- Discretization of PDE
- Physical models
- Mesh Motion
- Numerical schemes
- Parallel processing
- Thermo-dynamic data
- Matrix solver
- Post-processing



발사관 이탈 해석



Shroud Release 해석



# Open source software

- 오픈소스 소프트웨어(공개소프트웨어)란?
  - 소스코드가 공개되어 있는 SW
  - 자유롭게 사용,복제,배포,수정 할 수 있다
  - 자유 SW(Free Software)를 포함한 넓은 의미로 사용
  - 리눅스 커널, Apache 웹서버, FireFox 웹브라우저, MySQL 데이터베이스 시스템, Python/PHP/Perl 언어, Eclipse 툴...



# Open source software

- 오픈소스 라이선스의 목적

- 오픈소스 SW를 상업적 소프트웨어를 개발하는데 사용하고 해당 소스 코드를 공개하지 않을 위험을 막고 소스 코드의 공개를 강제하기 위함

- 오픈소스 라이선스의 공통 내용

- 라이선시는 해당 오픈소스 소프트웨어를 자유롭게 사용, 복제할 수 있으며, 일정한 조건하에 재배포할 수 있다.
- 라이선시는 해당 오픈소스 소프트웨어를 자유롭게 수정하여 사용할 수 있으며, 일정한 조건하에 수정된 내용을 재배포할 수 있다.
- 라이선시는 해당 오픈소스 소프트웨어의 소스코드를 자유롭게 획득하고 접근할 수 있다.

# Open source software

- CAE 오픈소스 프로그램들

- CFD

OpenFOAM, Code Saturne, SU2, Typhon, Palabos, Gerris, FDS, REEF3D, OpenFlower

- FEM

Code Aster, Elmer, CalculiX, DUNE, deal.II, FreeFem++, GetFEM++, Hermes, IFEM, FEMM

- Pre/post

Salome, FreeCAD, Gmsh, Paraview



Elmer

<b>Binaries</b>
<b>Documentation</b>
<b>Sources and compilation</b>
<b>Application examples</b>
<b>Interfaces</b>
<b>White papers</b>
<b>Presentations</b>
<b>User forums</b>
<b>Elmer on Grids</b>
<b>FAQ</b>
<b>Links</b>
<b>Services and contact</b>

Elmer

Open Source Finite Element Software for Multiphysical Problems

Elmer is an open source multiphysical simulation software mainly developed by CSC - IT Center for Science (CSC). Elmer development was started 1995 in collaboration with Finnish Universities, research institutes and industry. After it's open source publication in 2005, the use and development of Elmer has become international.

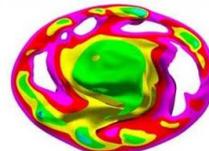
Elmer includes physical models of fluid dynamics, structural mechanics, electromagnetics, heat transfer and acoustics, for example. These are described by partial differential equations which Elmer solves by the Finite Element Method (FEM).

These pages are intended to give information on the Elmer software and to improve the information transfer in the Elmer community.

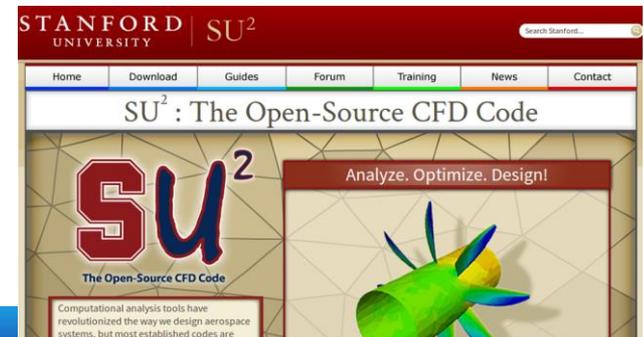
Suomeksi CSC's homepage



Tämä sivu suomeksi



Temperature distribution of melt flow in Czochralski growth of silicon.



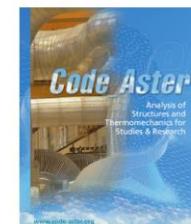
Code\_Aster

Home page Presentation Documentation Training material Forum Download Support ProNet

English

**Presentation**  
Example of studies  
Salome-Meca  
Performances  
Film 20 years  
Contact computation  
between 2 square plates

**Presentation**



The presentation booklets accessible here depict the functionalities of Code\_Aster and Salome.

To know more about Code\_Aster, follow the links in the menu on the left.



French version



German Version



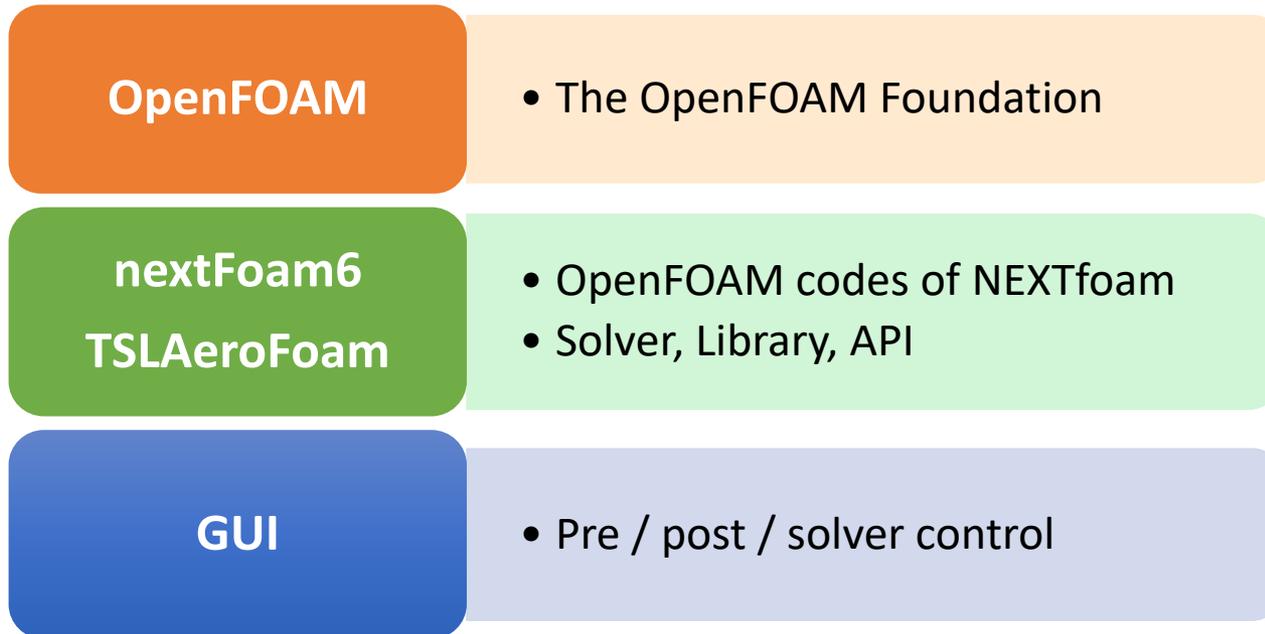
Salome 6

# OpenFOAM

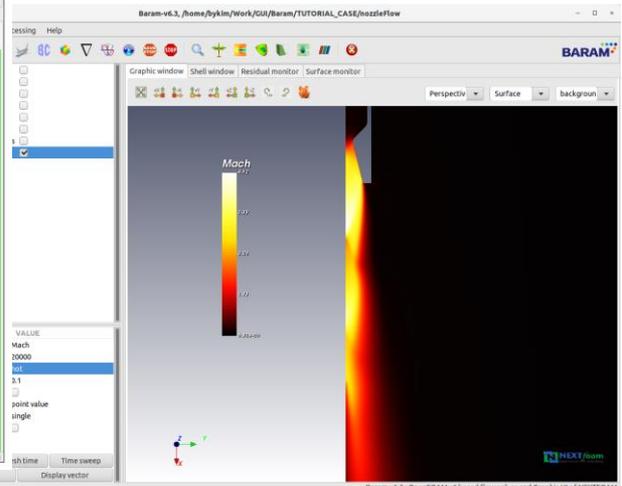
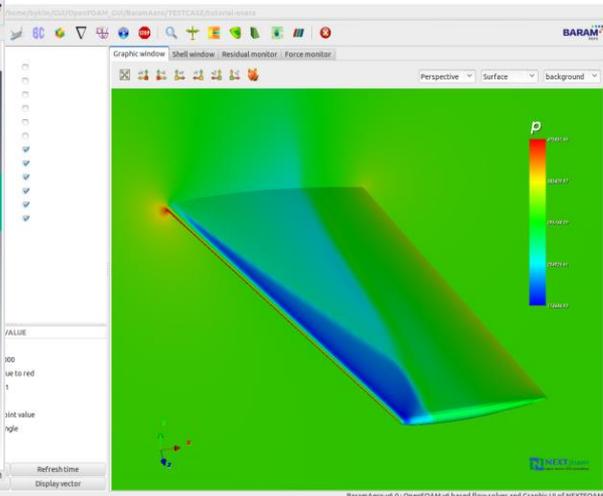
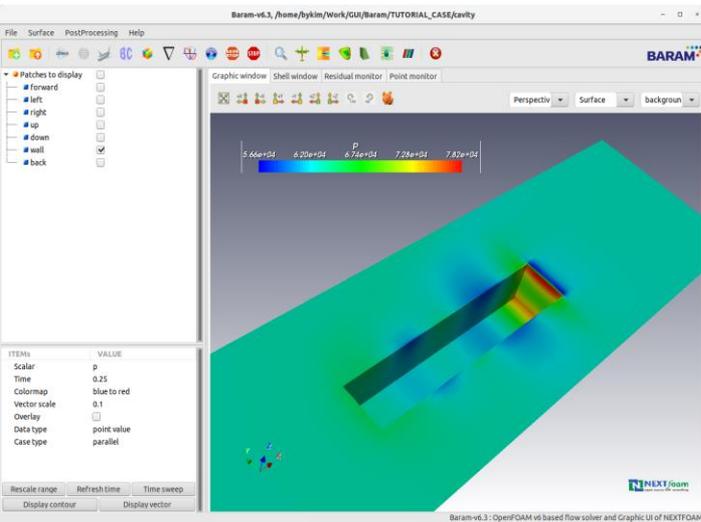
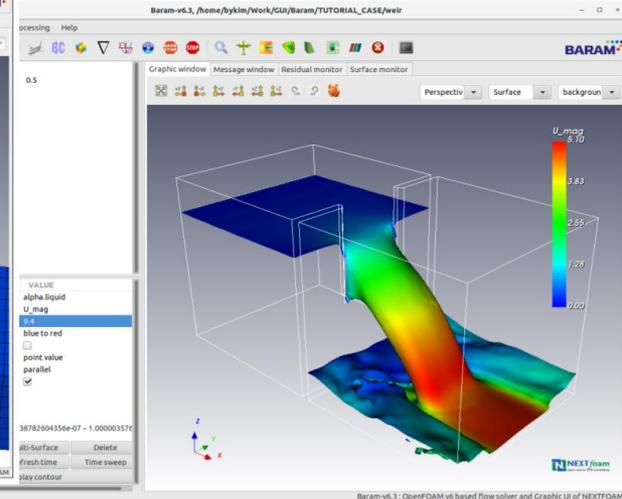
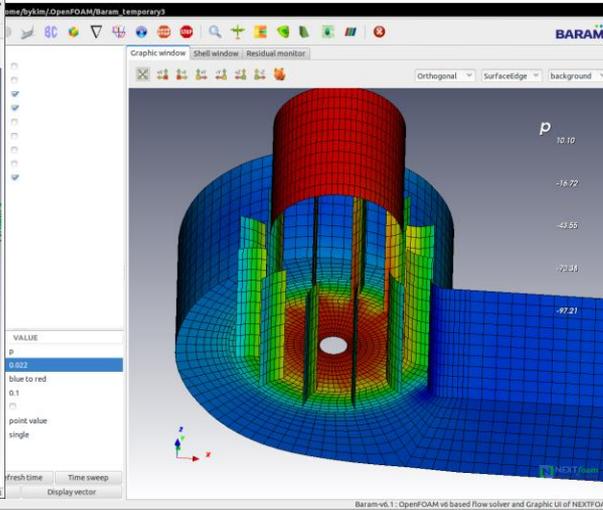
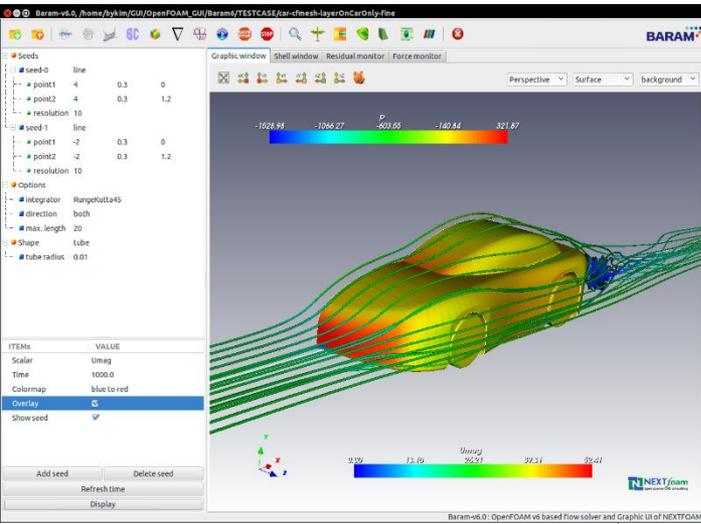
- **Open Field Operation And Manipulation**
- Open Source CFD **Tool Box**
- 벡터/스칼라 장(field)의 미적분 지배방정식 계산을 위한 C++ 소스코드/라이브러리 모음
- 2004년 OpenCFD Ltd.에서 v1.0 공개
- 라이선스 : GNU GPL v3
- 현재 버전
  - OpenFOAM Foundation : OpenFOAM v9
  - ESI/OpenCFD Ltd. : OpenFOAM v2112
  - OpenFOAM extend group : foam-extend-4.1

# What is BARAM?

- OpenFOAM® based CFD package
- Developed by NEXtfoam Inc., open source with GNU GPL



# Screen shots



# What is BARAM?

- Improve on the weakness of OpenFOAM

## Accuracy/stability of solver

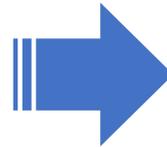
- Problems with poor mesh quality
- Sensitive to initial conditions

## Complicate solver setup

- Many boundary condition files
- Complicate numerical method setup & Data extract/monitoring method

## Uncomfortable user interface

- Text User Interface
- Linux - unfamiliar OS, text editor



OpenFOAM code improvement

API development

Graphic User Interface / WSL

# Capabilities of BARAM

## Solver

- Incompressible solver with SIMPLE/PIMPLE algorithm
- Density based coupled compressible solver
- Pressure based all Mach No. range solver with flux splitting method
- Heat transfer solver : convection/radiation/conjugated
- free surface(VOF) solver
- Cavitation solver
- Incompressible/compressible species transport solver
- Passive scalars can be added

## Turbulence model

- $k-\epsilon$  : standard, realizable, RNG, realizable 2 layer
- $k-\omega$  SST, Spalart-Allmaras
- Laminar, Euler

# Capabilities of BARAM

## Mesh

- Create : snappyHexMesh, cfMesh
- Convert : Fluent, StarCCM+, Gmsh, Ideas unv
- Mesh information, Check mesh quality, scale, rotate, translate
- Create baffle/interior
- Refine first boundary layer cells
- Create axi-symmetry/2D mesh
- Region split

## Boundary condition

- Velocity, pressure, flowrate, outflow, freestream, profile
- Atmospheric boundary condition
- Adiabatic wall, isothermal wall, heat flux wall, convection wall, thermos coupled wall
- Riemann, subsonic in/out, supersonic in/out
- Open channel boundary condition
- Internal interface, rotational periodic, translational periodic, cyclic
- Fan, porous jump, symmetry, empty, wedge

# Capabilities of BARAM

## Cell zone condition

- Porous media, MRF, sliding mesh, actuator disk, fixed velocity
- Source term – scalar source, fixed value

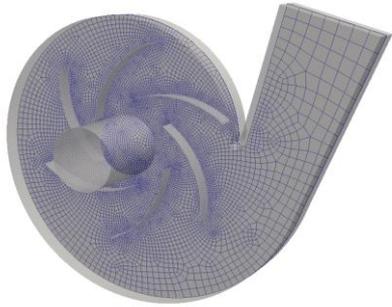
## Solver setup & control

- Initial/boundary/cell zone setup
- Numerical method, initialize/run options – set fields, map fields, potential flow
- Batch run setup – Mach/AOA/AOS/boundary value
- Monitoring setup – force, point value, surface/volume value

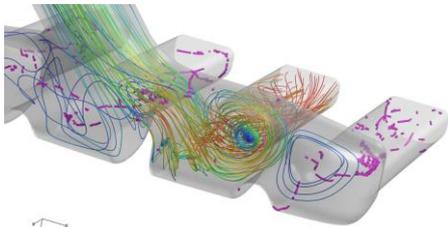
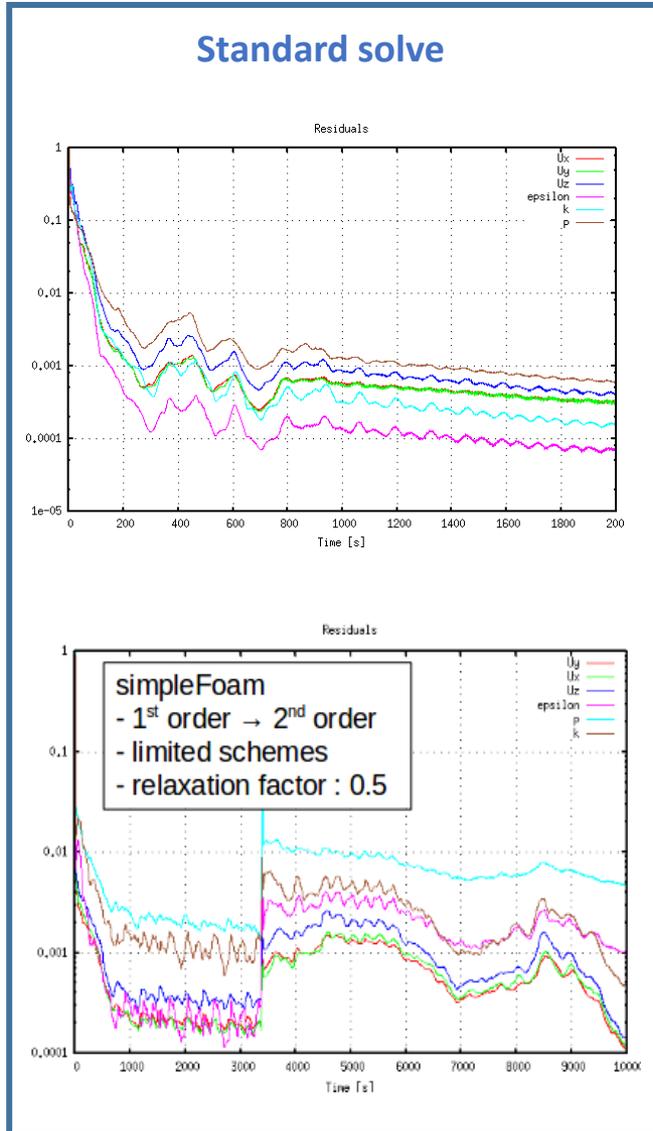
## Post-processing

- Report – force, point value, surface/volume(flowrate, integral, average, min, max, CoV)
- Contour/vector display at patch and cutting plane
- Display iso-surfaces, streamlines, clip
- Create fields – Q, vorticity,  $y^+$ , total pressure, wall shear stress, wall heat flux
- Launch ParaView

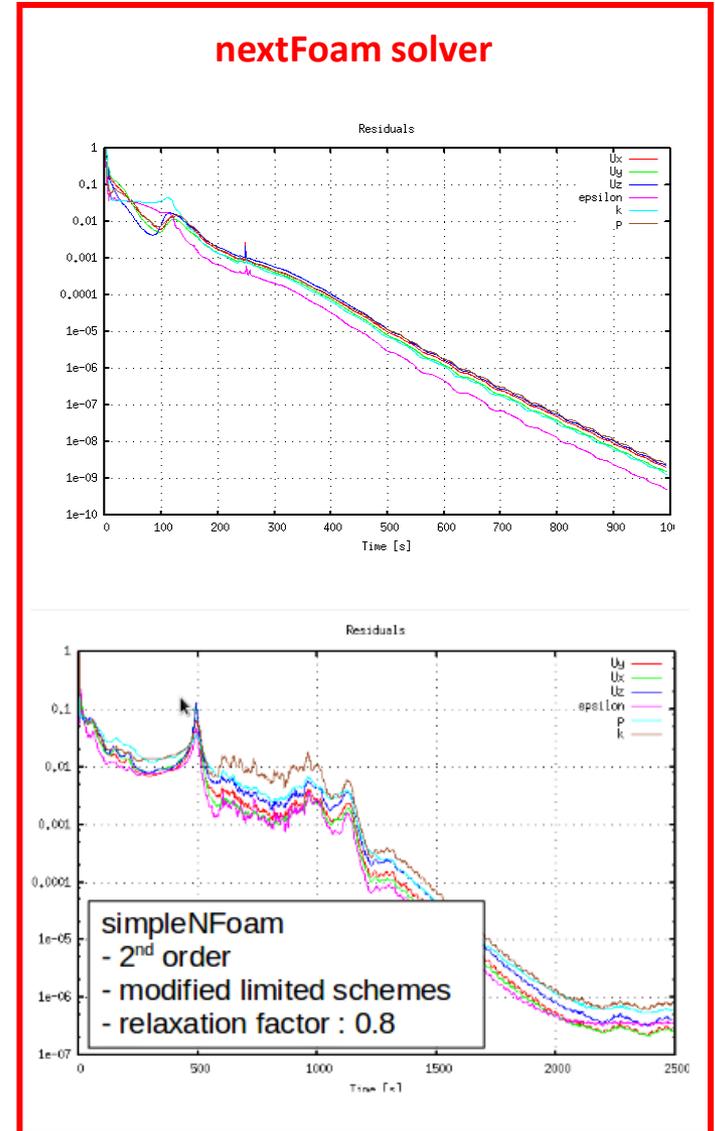
# Solver improvement – robustness



Fan

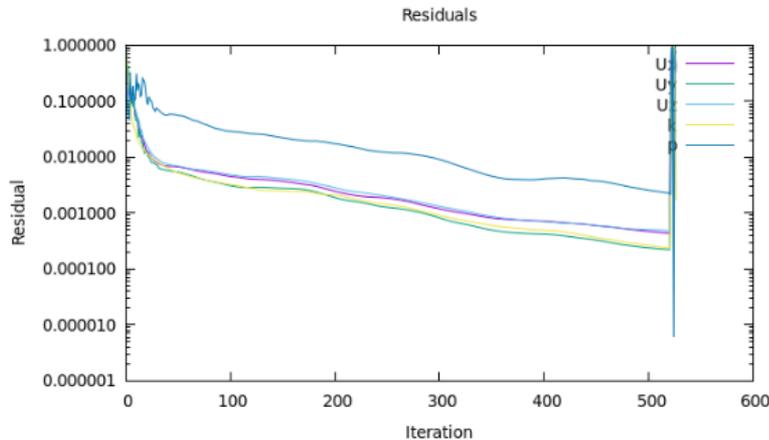
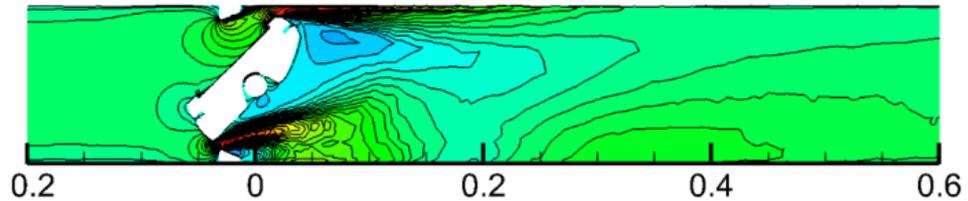
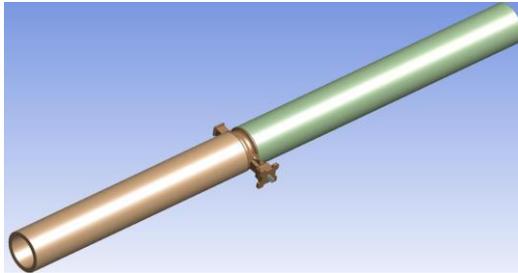


manifold

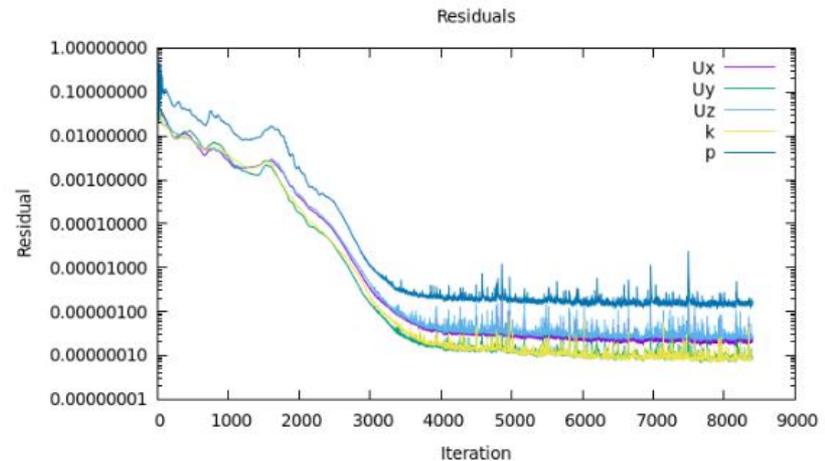


# Solver improvement – stability

- Internal turbulent flow past a partially closed valve : a comparison between OpenFOAM and FLUENT, Omid Ejtehad, KISTI, 2019 OKUCC
- Less than 1% difference compared to FLUENT



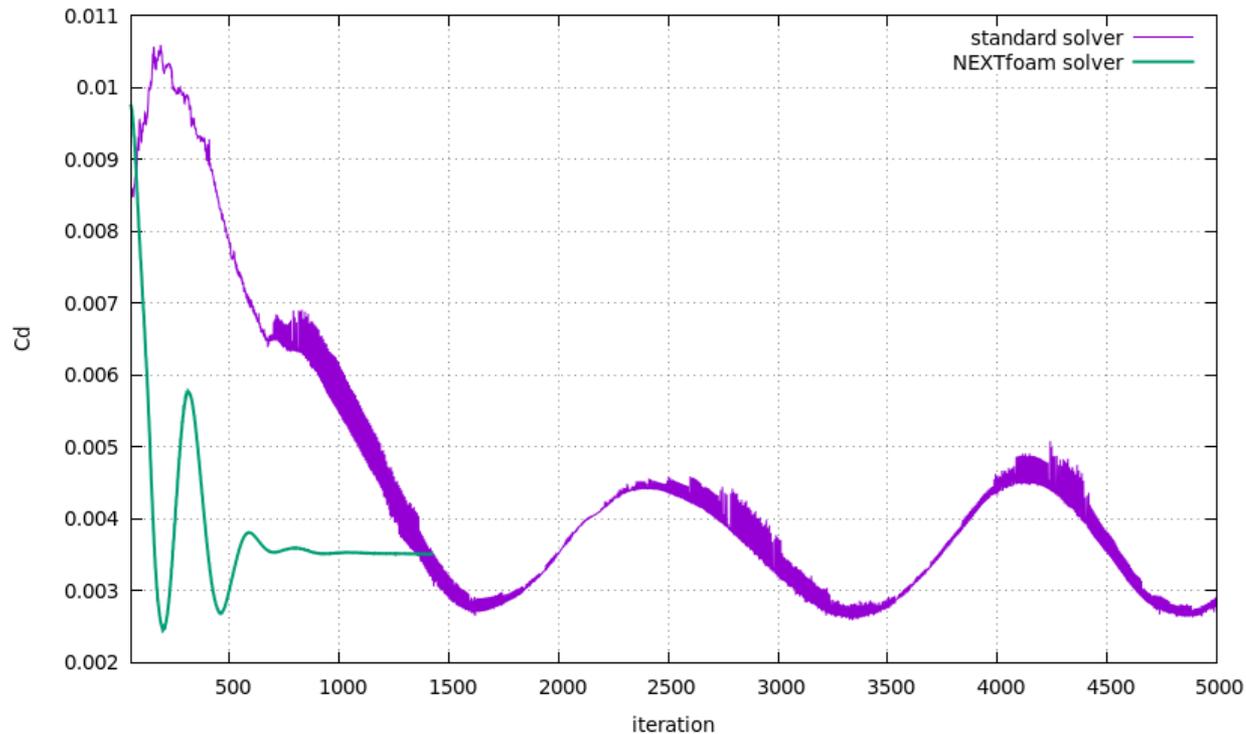
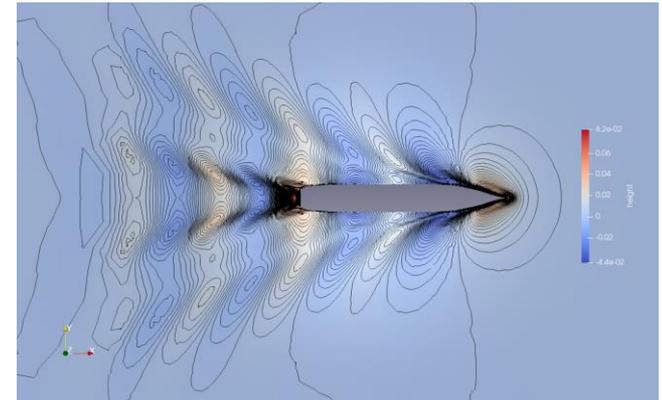
Standard OpenFOAM solver  
- diverged



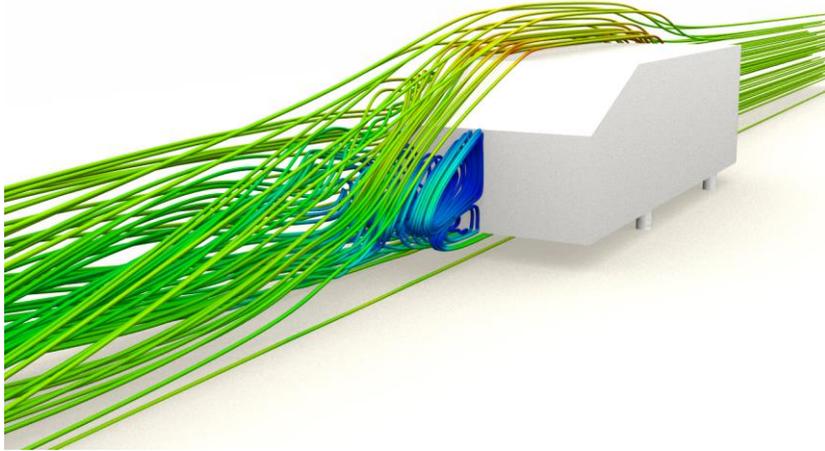
BARAM  
- convergence reached

# Solver improvement – efficiency

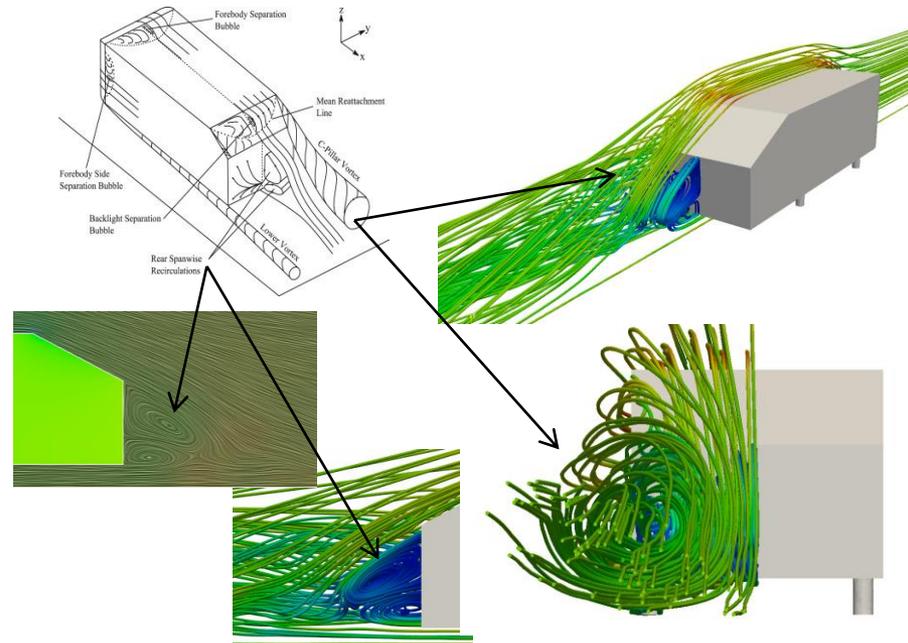
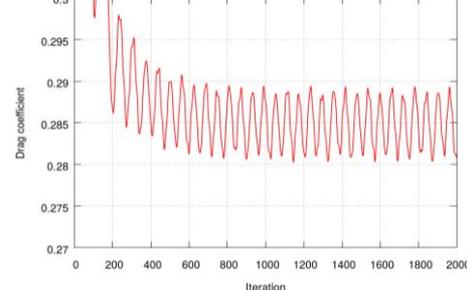
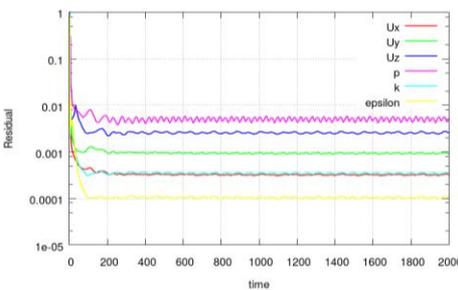
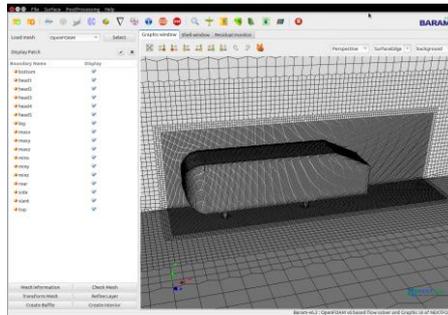
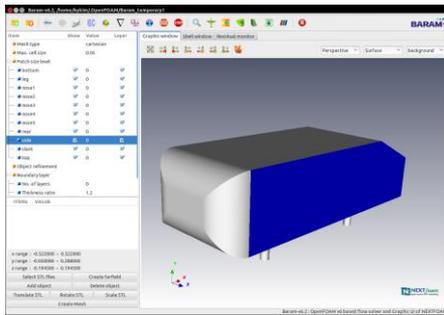
- Volume Of Fluid(VOF) solver
- KCS resistance simulation
- Time advance scheme is Local Time Step(LTS)
- Compare the convergence history of drag coefficient



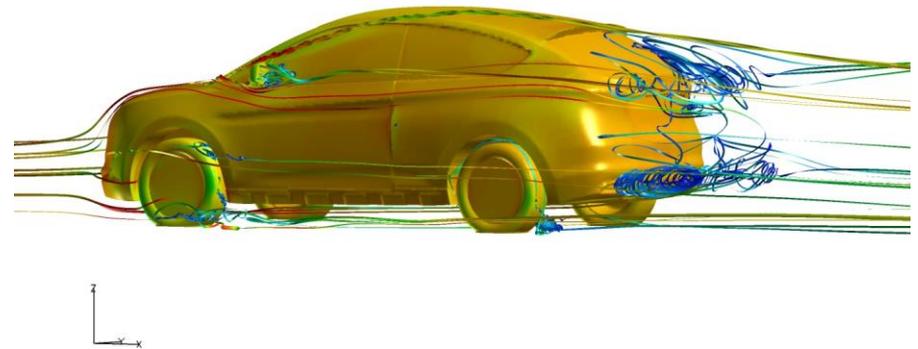
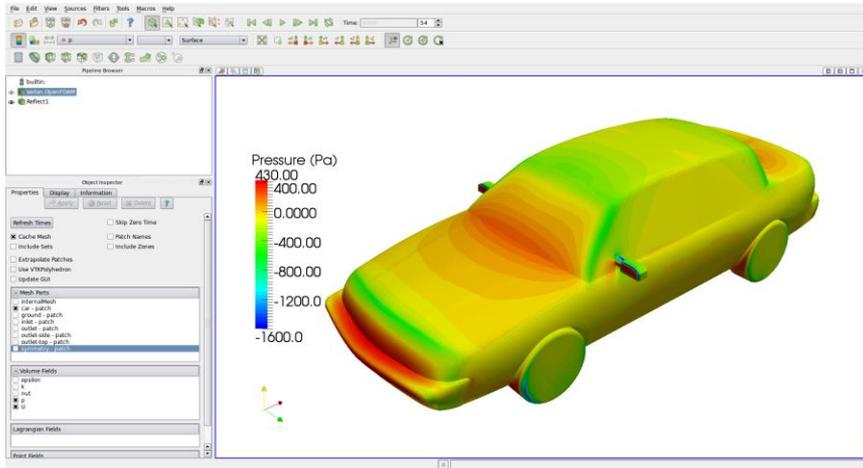
# Validation case – Ahmed body



- S.R. Ahmed, 단순화된 자동차 모형, 후방 경사각에 따른 유동 구조의 변화 실험
- S.R. Ahmed, G. Ramm, Some Salient Features of the Time-Averaged Ground Vehicle Wake, SAE-Paper 840300, 1984
- 본 연구에서는 경사각이 25도, 입구속도 40m/s 조건
- **Cd : 계산결과는 0.2849, 실험값은 0.285**



# Validation case – incompressible aerodynamics

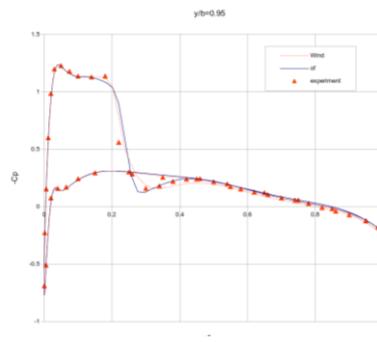
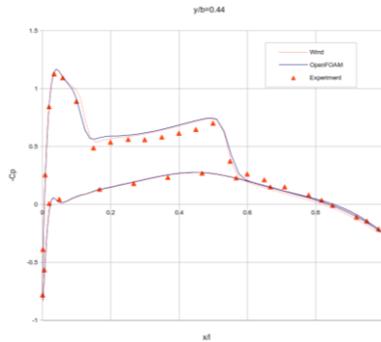
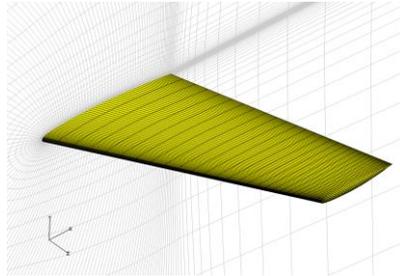
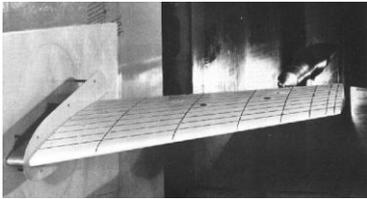


- 속도 100km/hr
- Standard k-epsilon
- **Cd : 0.109 / 0.109 (Commercial code/BARAM)**

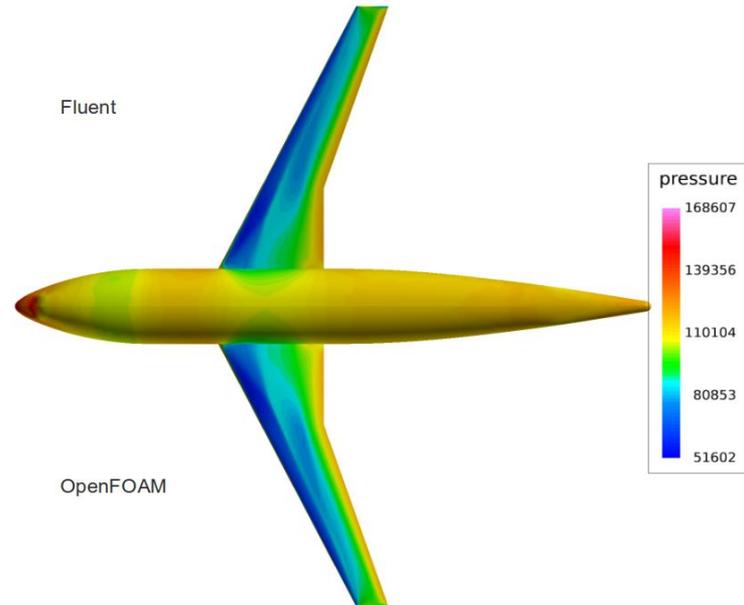
- 속도 100km/hr
- **Cd : 0.3090 / 0.3201 (Commercial code/BARAM)**
- **Cl : 0.2031 / 0.2009 (Commercial code/BARAM)**

# Validation case – compressible aerodynamics

- 밀도기반 압축성 솔버 - TSLAeroFoam



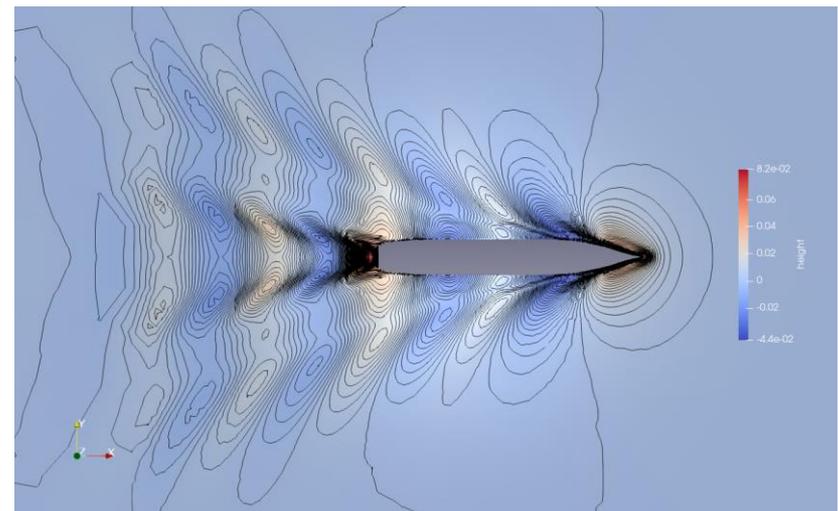
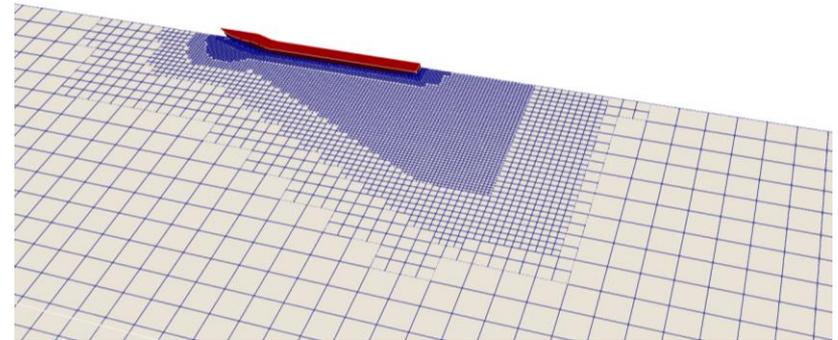
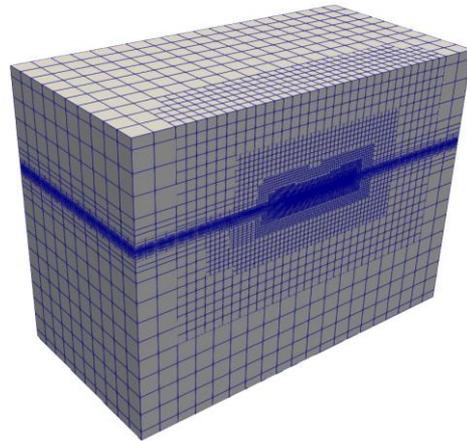
- ONERA M6 wing
- Mach No. = 0.8395
- <https://www.grc.nasa.gov/www/wind/valid/m6/wing/m6wing.html>



- DLR wing-body
- AIAA Drag Prediction Workshop
- Mach No. = 0.75
- AOA = 0.49

# Validation case – ship(KCS) resistance

- 자유수면 해석을 위한 VOF(Volume Of Fluid) 솔버 – interNFoam
- Reference : Kim WJ, Van SH, Kim DH, 2001, *Measurement of flows around modern commercial ship models*, Experiments in Fluids
- $U = 2.196\text{m/s}$ ,  $Fr = 0.26$ ,  $Re = 1.4e7$ , Draft = 0.3418m, Wetted surface area =  $9.5121\text{m}^2$
- 953,801 cells



Drag coefficient	Experiment	CFD	Difference
Pressure ( $C_r$ )	7.250e-04	7.267e-04	+0.23%
Friction ( $C_f$ )	2.832e-03	2.780e-03	-1.88%
Total ( $C_t$ )	3.557e-03	3.506e-03	-1.44%

# Validation case – hydrofoil cavitation

- Viscous and Nuclei Effects on Hydrodynamic Loadings and Cavitation of NACA66(Mod) Foil section, Y.T. Shen, P.E. Dimotakis, J. Fluids Eng. Sep. 1989
- 속도 : 2.01m/s
- Cavitation No. : 0.84
- Realizable k-epsilon
- Cavitation model : Schnerr-Sauer

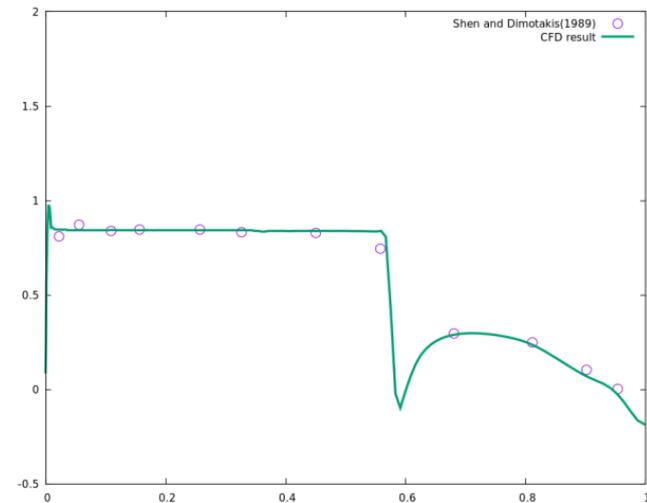
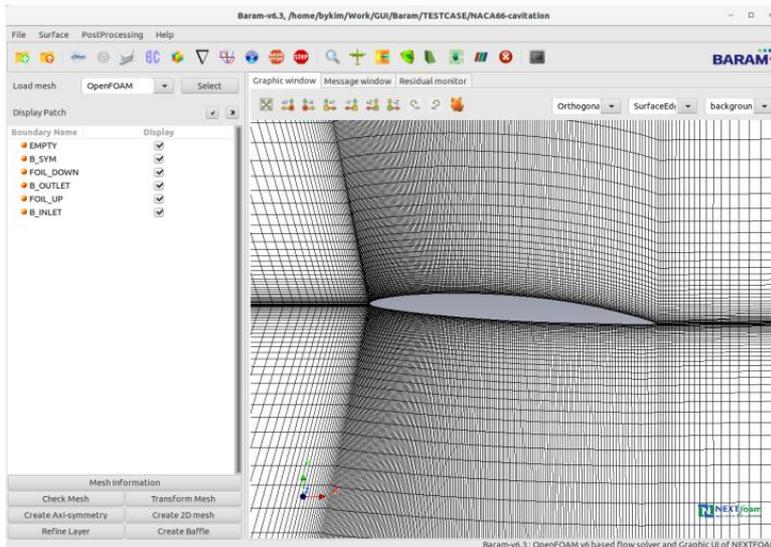
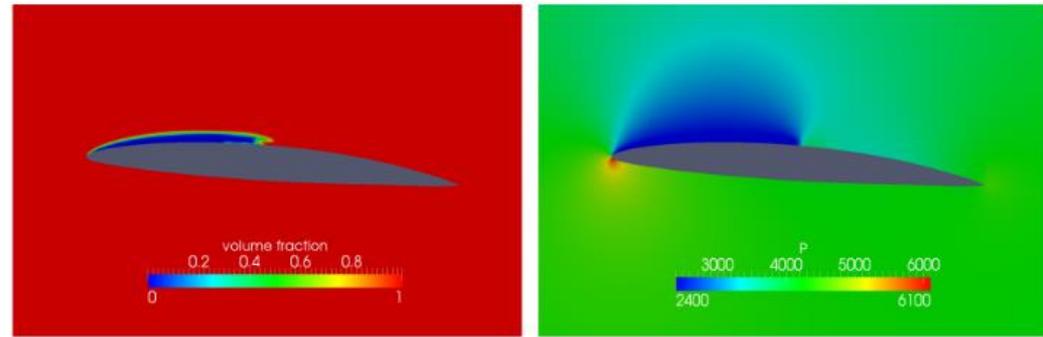
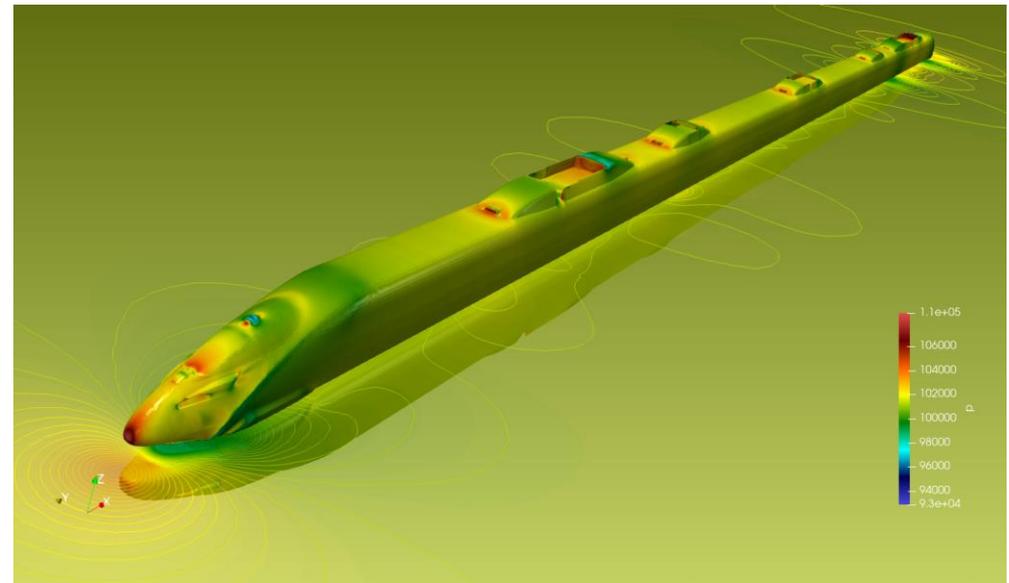
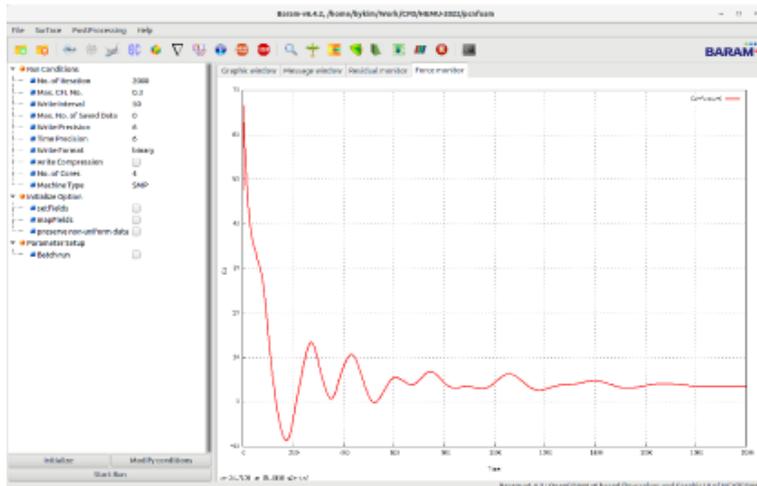


그림 16.8: 익형 표면에서의 압력 분포

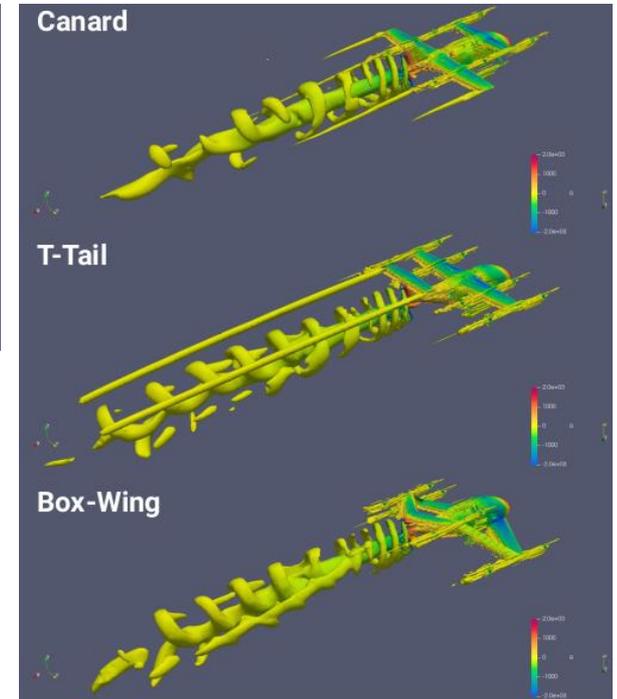
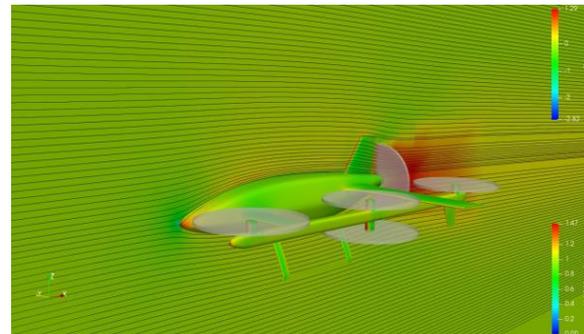
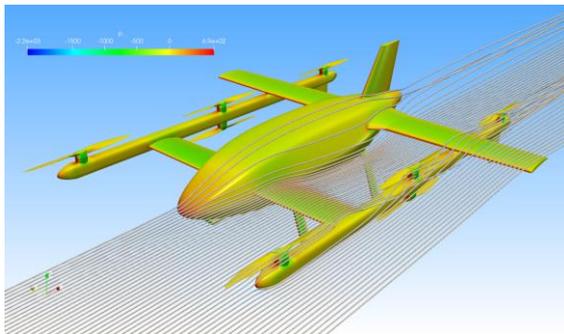
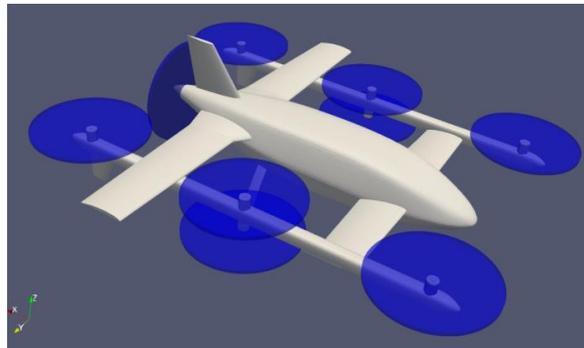
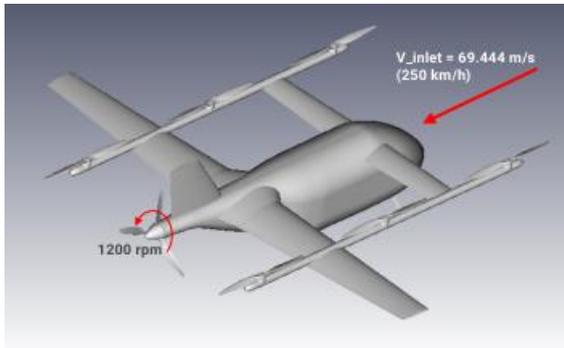
# Application – high speed train

- HEMU(High speed Electric Multiple Unit)
- Speed : 400 km/hr (Mach No  $\approx 0.33$ )
- SST k-omega
- Pressure based compressible solver, PCNFoam
- Steady solution of drag is converged about 2000 iterations



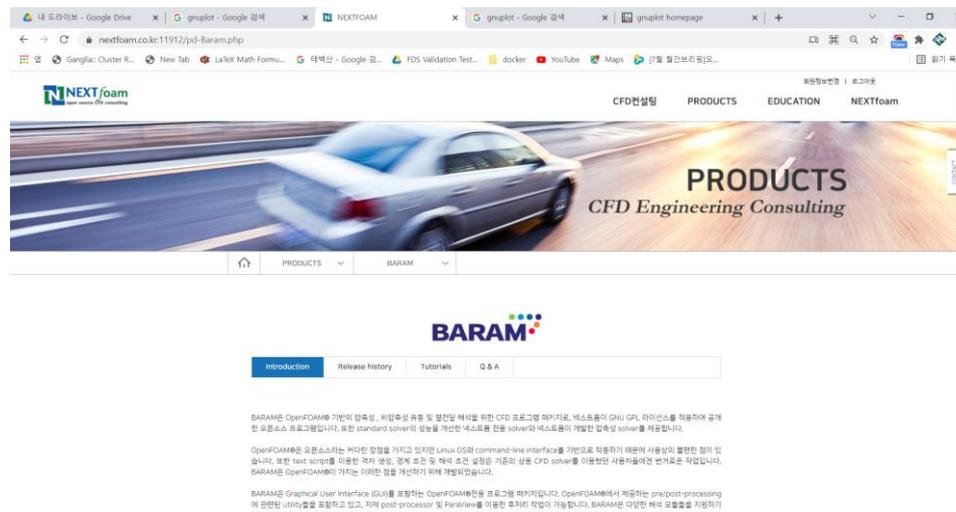
# Application – drone aerodynamics

- Multi-rotor drones
- Rotor can be modeled with sliding mesh or actuator disk
- Incompressible flow solver –simpleNFoam or pimpleDyMNFoam
- Simulation for Aerodynamic database, effect of design parameters

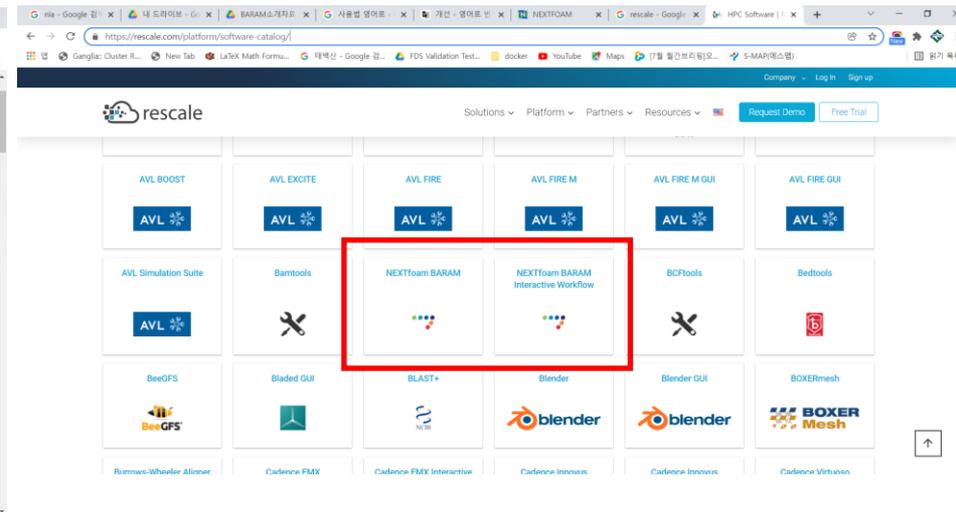


# How to use BARAM

- Download at NEXTfoam homepage
  - Install file, source code, tutorials, Q&A
- Use on Rescale cloud platform
  - NEXTfoam BARAM / NEXTfoam BARAM Interactive workflow

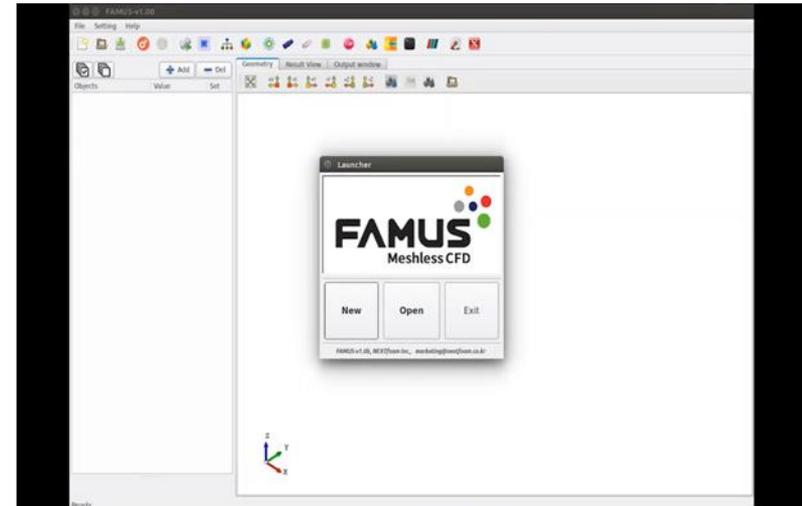


<https://nextfoam.co.kr/pd-Baram.php>



<https://rescale.com/platform/software-catalog/>

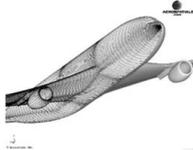
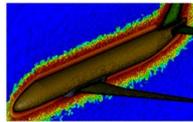
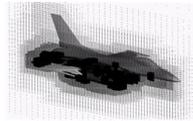
- FAMUS (Fully Automated MUlti-physics Simulator)
  - 국방과학연구소 무격자 유동 해석 기법 이전 → 넥스트폼/서울대 공동 개발
  - 무격자 기반 해석 기술 + 그래픽 사용자 환경 제공
  - 파라미터 기반 전처리 자동화 (CAD clean-up / 자동 질점 생성)
  - 압축성/비압축성 해석 / 6DOF 해석



# 무격자 기법

## • 격자 기반 해석 기법의 한계

- 해석기술/해석자원의 발달로 복잡한 3차원 물체 주위의 유동 해석 요구 증대
  - 해석 격자 생성
  - 많은 시간과 노력이 필요할 뿐만 아니라 숙련된 전문가의 노하우가 필요
- 복잡한 작업 과정(격자 분할, 병합, 겹침 판단 등)→자동화 어려움
- 전처리 과정에서 어려움은 CFD의 대중적 확산에 가장 큰 걸림돌
- FAMUS 는 격자를 사용하지 않는 무격자 해석 기법을 채택
  - 사용자 편의성과 작업 효율성을 극대화

	CAD	표면 격자	볼륨 격자	유동 해석
격자 기반 해석 기법				
		소요 기간 : 한 달 이상		
무격자 해석 기법				
		소요 기간 : 하루 이내		

# 무격자 기법

## • 격자계와 무격자계 비교

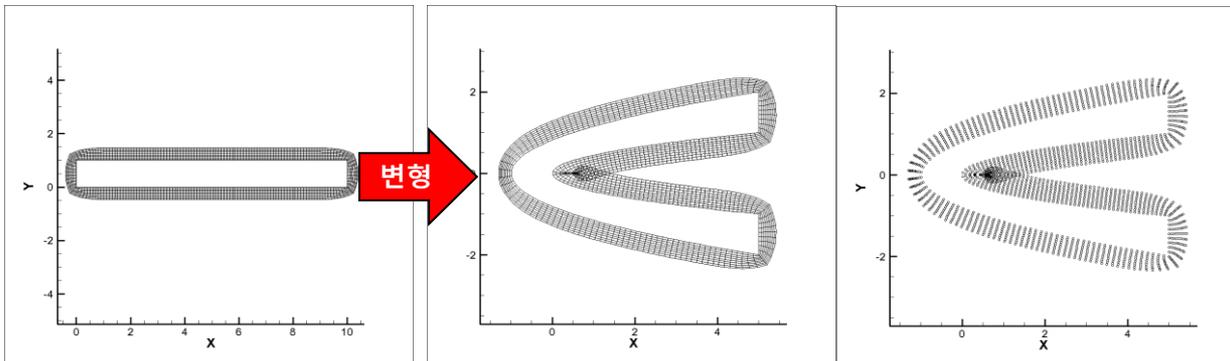
- 물체가 이동/변형되는 상황에서 격자계와 무격자계 비교

### 격자계

- 격자 꼬임 현상이나 질 나쁜 격자 발생 가능
- 이를 방지하기 위해 격자 재생성 과정에서 많은 시간이 소모
- 물체 변형이나 이동이 급격하게 발행하는 어플리케이션 계산 적용에 어려움

### 무격자 질점계

- 점의 연결 정보만 사용하기 때문에 유동 계산 영역을 재생성하지 않고 해석 가능
- 국소적으로 규칙에 따라 질점을 삭제/생성하고 연결정보 업데이트
- 낙하산, 에어백과 같은 물체의 급격한 변형을 해석하는 경우에도 유연하게 적용 가능

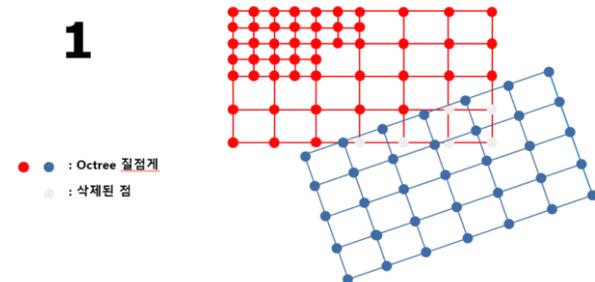


변형 전

변형 후  
(격자 재생성 필요)

변형 후  
(해석 가능)

1



다른 Octree 질점계들끼리 겹치는 영역에서 점 삭제

# 무격자 기법

## 중첩격자계와 무격자 질점계 비교

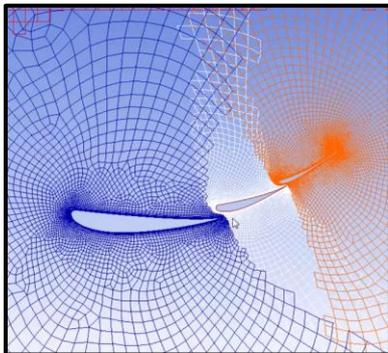
- 이동격자기법의 대표인 중첩격자계와 무격자 질점계 비교

### 중첩격자계

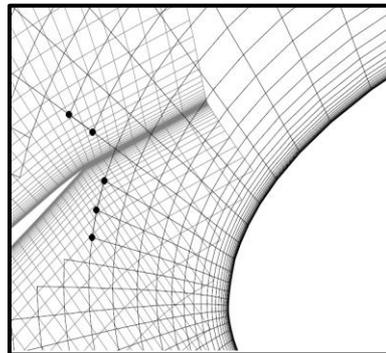
- 다중 물체가 동시에 겹치는 경우 셀을 선정할 때 자동화가 어려움
- 격자계의 경계면에서 유동 정보의 교환 필요 (정보 교환과정에서 에러 생성)
- 격자계간 격자 사이즈가 크게 나는 현상 발생 가능 (공간정확도가 큰 격자에 좌우)

### 무격자 질점계

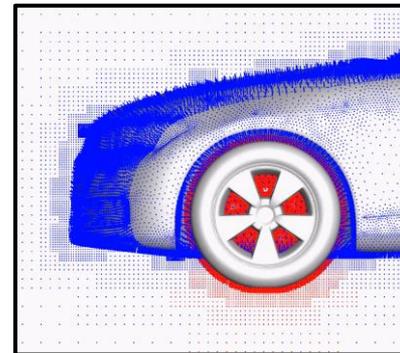
- 다중 물체가 동시에 겹쳐도 자동적으로 질점 배치
- 하나의 계산영역으로 구성되어 정보 교환 없이 모든 점에서 수치 계산
- 우선 순위가 높은 질점이 배치되므로 가장 정확하게 계산할 수 있는 계산 영역 생성



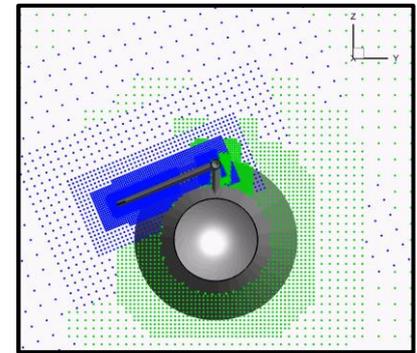
다중 물체 겹침



격자 사이즈 미스매치



물체가 겹쳐도 강건한 질점계 구성



양질의 질점계 생성

# 무격자 기법

## • 무격자 계수 계산

### ■ LSM 기반 미분계수 계산

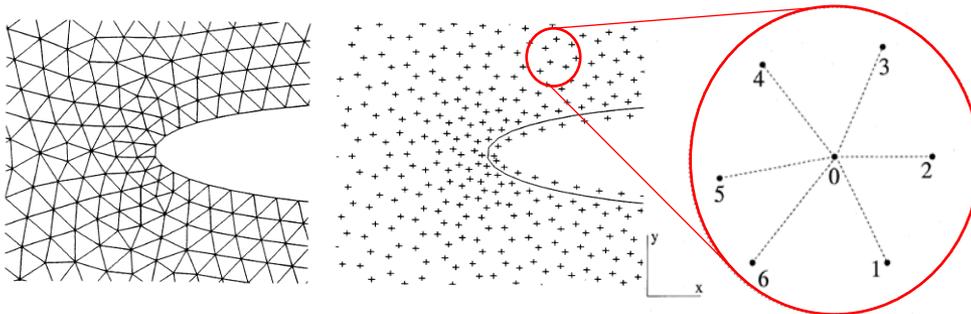
- 기준점에서 주변 질점 간 Taylor series 전개
- $\sum \langle \text{Weighting} \rangle \times \langle \text{Truncation error} \rangle$  이 최소가 되는 미분계수

### ■ 기존 무격자 기법 한계 → 물리량 비보존

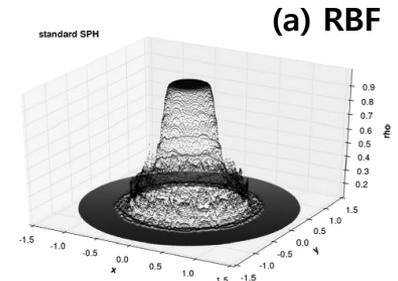
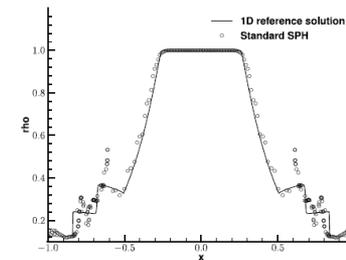
- 질량 유량 에러, 충격파의 위치 / 충격파 후류의 물성치 예측 에러
- 초음속/극초음속 영역에서는 기존 기법 적용 어려움

$$\left. \frac{\partial \phi}{\partial x} \right|_0 \cong \sum_{j=1}^n a_{0j} (\phi_j - \phi_0), \quad \left. \frac{\partial \phi}{\partial y} \right|_0 \cong \sum_{j=1}^n b_{0j} (\phi_j - \phi_0)$$

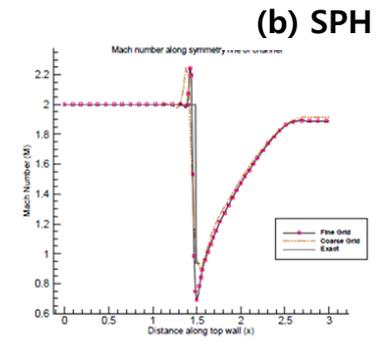
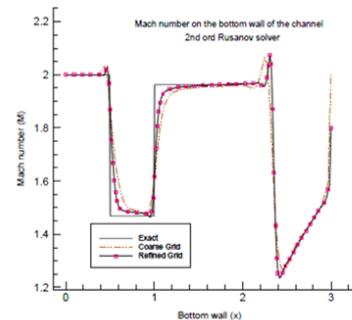
$$\text{minimize} \left( \sum_{j=1}^n \omega_{0j} \left[ \Delta \phi_{0j} - \Delta x_{0j} \frac{\partial \phi_0}{\partial x} - \Delta y_{0j} \frac{\partial \phi_0}{\partial y} \right]^2 \right)$$



<무격자기법의 미분계수 계산>



(a) RBF



(b) SPH

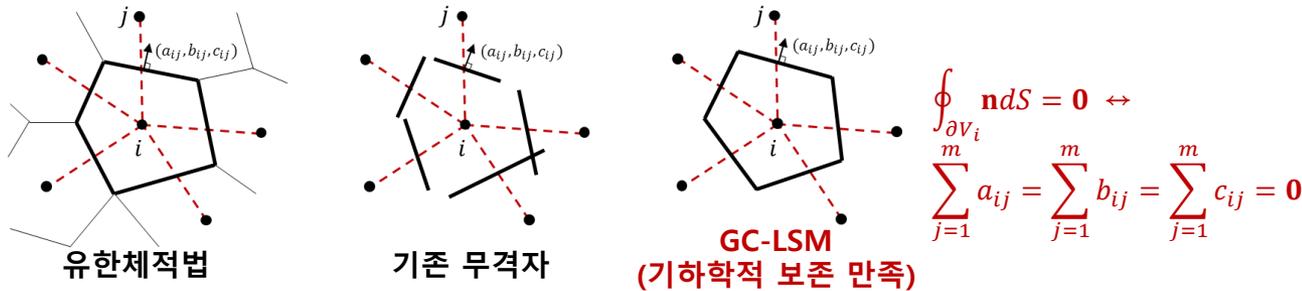
<기존 무격자기법 비보존성 예시>

# 무격자 기법

## • GC-LSM 기법

### ■ 국부적으로 기하학적 보존을 만족하는 무격자 계수

- 기존 무격자 기법의 한계인 비보존 현상을 극복 (e.g. 충격파 포착, 노즐내부 유량 생성)
- 저속 유동에서부터 고속 유동까지 정확성 확보



### ■ 유한체적법(FVM) vs. 무격자해석기법(Meshless Method)

- FVM과의 비교를 통해 무격자기법의 비보존 특성을 분석

$$\int_{V_i} \frac{\partial \mathbf{q}}{\partial t} dV + \oint_{\partial V_i} \mathbf{F} \cdot \mathbf{n} dS = 0 \Leftrightarrow \frac{\partial \bar{\mathbf{q}}_i}{\partial t} + \frac{1}{|V_i|} \sum_{j=1}^m \mathbf{F}_{ij} \cdot \mathbf{n}_{ij} |S_{ij}| = 0 \Leftrightarrow \frac{\partial \bar{\mathbf{q}}_i}{\partial t} + \sum_{j=1}^m \mathbf{F}_{ij} \cdot \mathbf{n}_{FVM,ij} = 0$$

$$\frac{\partial \mathbf{q}_i}{\partial t} + \sum_{j=1}^m a_{ij} \Delta \mathbf{f}_{ij} + \sum_{j=1}^m b_{ij} \Delta \mathbf{g}_{ij} + \sum_{j=1}^m c_{ij} \Delta \mathbf{h}_{ij} = 0 \Leftrightarrow \frac{\partial \mathbf{q}_i}{\partial t} + \sum_{j=1}^m \Delta \mathbf{F}_{ij} \cdot \mathbf{n}_{ML,ij} = 0$$

$$\Leftrightarrow \frac{\partial \mathbf{q}_i}{\partial t} + \sum_{j=1}^m \mathbf{F}_{ij} \cdot \mathbf{n}_{ML,ij} - \mathbf{F}_i \cdot \sum_{j=1}^m \mathbf{n}_{ML,ij} = 0 \Leftrightarrow \frac{\partial \mathbf{q}_i}{\partial t} + \sum_{j=1}^m \mathbf{F}_{ij} \cdot \mathbf{n}_{ML,ij} - \mathbf{F}_i \cdot \left( \sum_{j=1}^m a_{ij}, \sum_{j=1}^m b_{ij}, \sum_{j=1}^m c_{ij} \right) = 0$$

= 0 (기하학적 보존)

# 무격자 기법

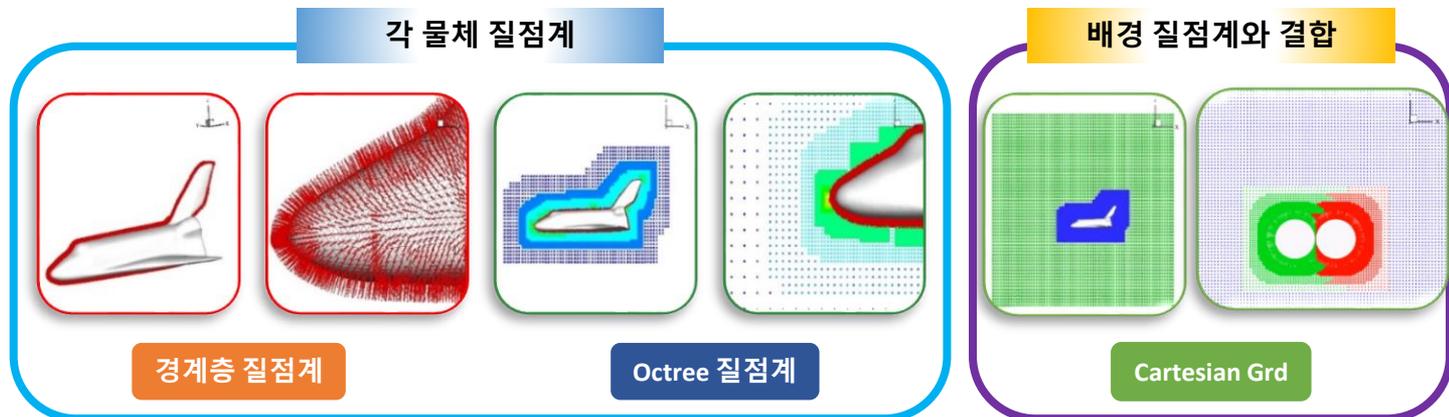
## • 해석 질점 생성 기법

### ■ 각 물체별 질점계

- 경계층 질점계 + Octree 질점계
- 경계층 질점계
  - 효율적인 점성 경계층 해석을 위해 표면 근처에서 표면에 수직한 방향의 질점 분포 필요
- Octree
  - 사용자의 노력과 시간을 최소화하면서 효율적인 계산 영역을 자동 생성하는 알고리즘 필요
  - 전 방향에 대해 균일한 질점 분포 필요
  - Connectivity 재구성을 위한 효율적인 주변 질점 탐색 알고리즘 필요

### ■ 배경 질점계

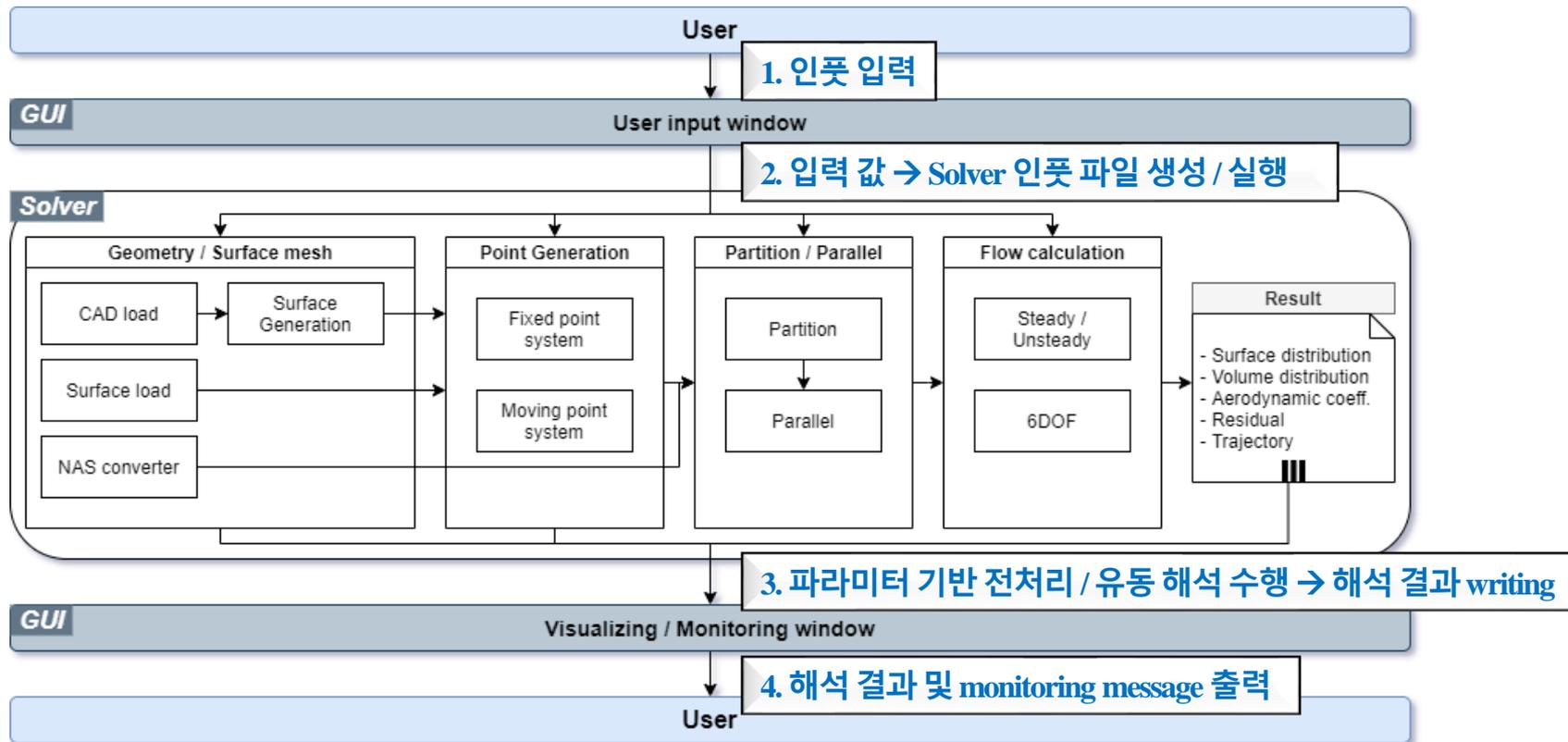
- Cartesian Grid : 거리와 방향에 대해 일정한 질점 분포를 필요



# FAMUS 구성 및 기능

## • FAMUS UI

- (1)사용자 인풋 입력, (2)솔버 인풋 파일 생성 및 (3)해석 프로그램 실행
  - Linux 운영체제 기반, 자체 개발 파이썬 스크립트 및 오픈소스 프로그램/라이브러리 구성
  - GUI, 3D/2D 데이터 가시화를 위한 라이브러리 활용 (PyQt, VTK, OCC, etc.)

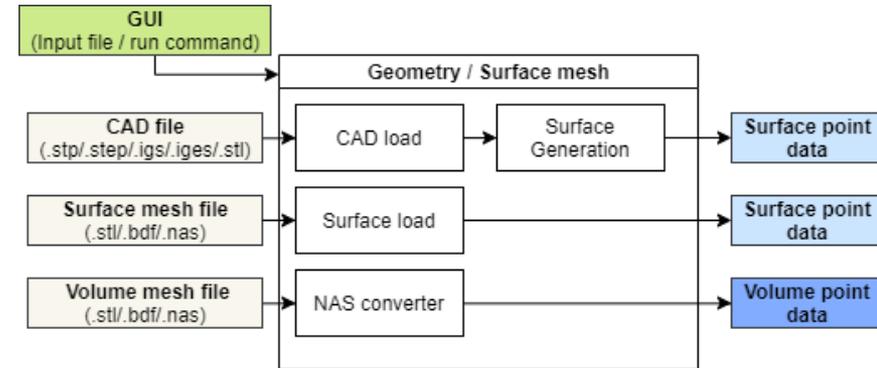


# FAMUS 구성 및 기능

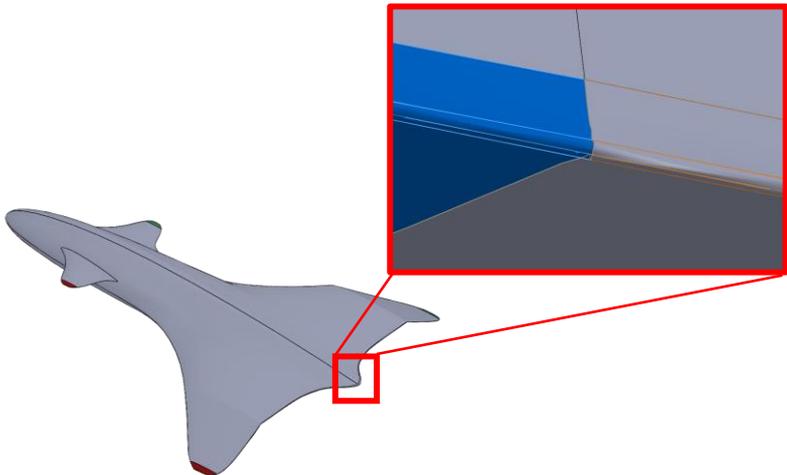
## • FAMUS Solver

### ■ 형상 / 표면격자 생성 모듈

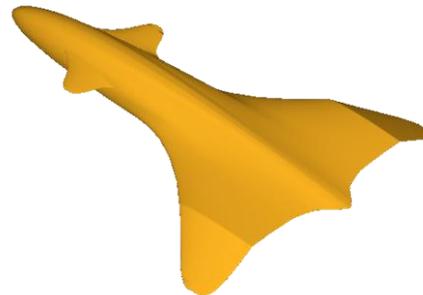
- CAD / Surface loader
  - CAD 파일 로드
  - 형상 healing/sewing/normal orienting/scaling
- Surface point generator
  - 파라미터 기반 표면 질점 자동 생성
- NAS converter
  - NAS 2D / 3D 격자 파일 → FAMUS 해석 질점 변환



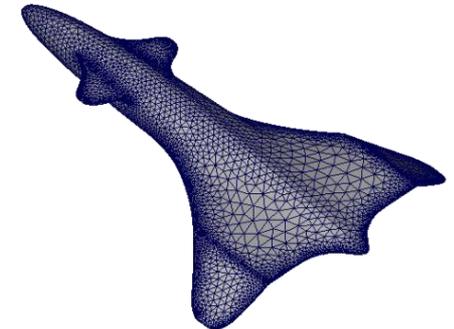
<형상 / 표면격자 모듈 구조>



< CFD 해석에 부적합한 CAD 파일 >



< Healing & Sewing & Normal orienting >



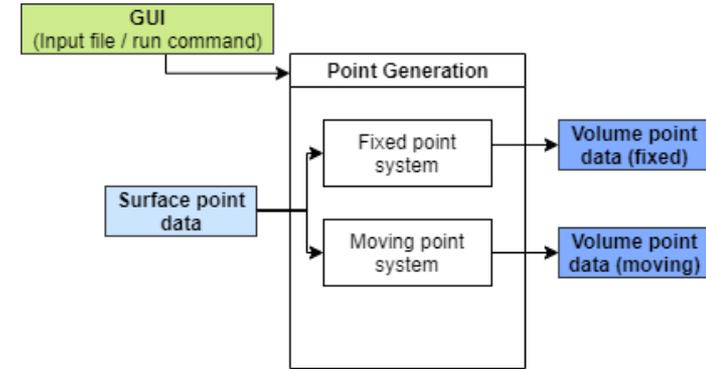
< 생성된 표면격자 >

# FAMUS 구성 및 기능

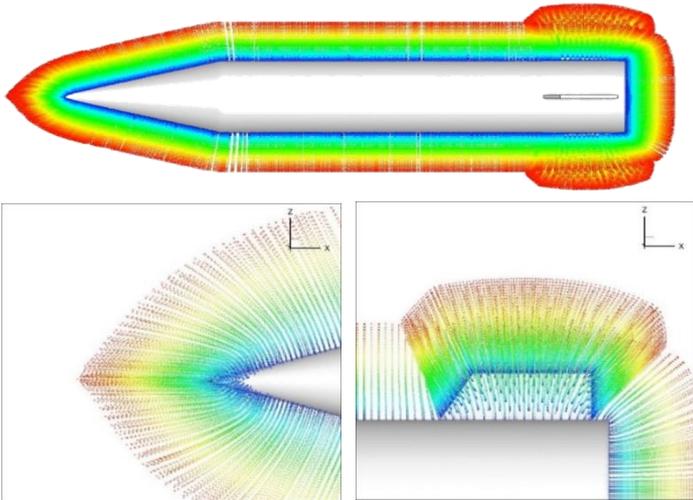
## • FAMUS Solver

### ■ 질점 생성 모듈

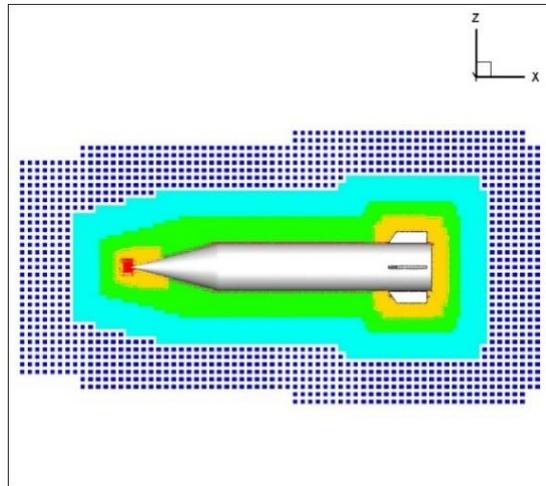
- 표면격자 생성 모듈에서 생성된 표면격자 기반
- 파라미터 기반 해석 질점 자동 생성
  - 고정 질점계 : 표면질점 + 프리즘 + 옥트리 구성
  - 이동 질점계 : 표면질점 + 프리즘 + 옥트리 + 배경질점계 구성
- 질점간 커넥티비티 계산
- 병렬화를 통한 신속한 질점 생성



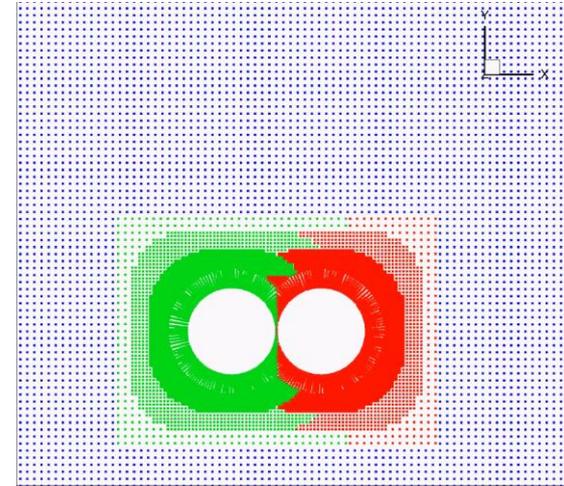
<질점 생성 모듈 구조>



<프리즘 레이어 질점 생성>



<옥트리 분할>



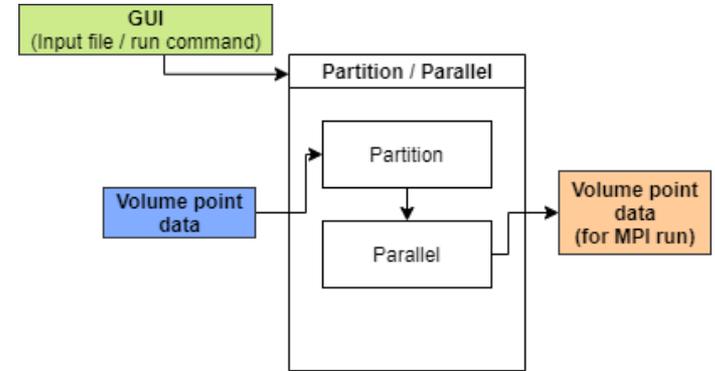
<최종 질점계>

# FAMUS 구성 및 기능

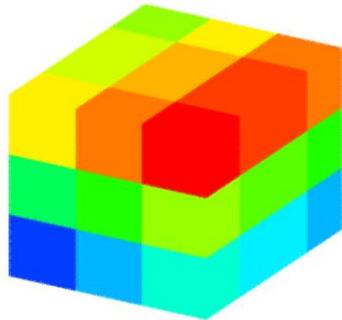
## • FAMUS Solver

### ■ 병렬화 모듈

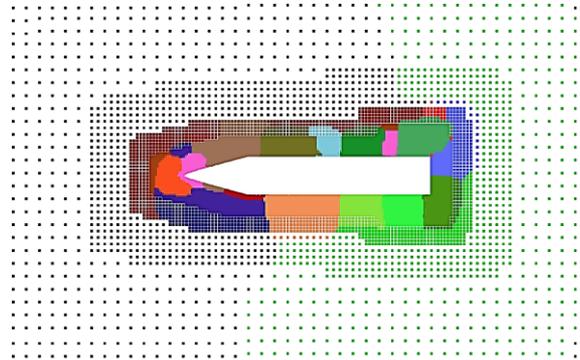
- Partition: 해석 질점 분할
  - Scotch 프로그램 이용 공간 질점 균등 분할
  - 배경 질점은 구조를 유지하여 병렬화
- Parallel: 병렬 해석 질점 파일 생성
  - 분할된 질점을 기반으로 병렬해석을 위한 질점 파일 생성



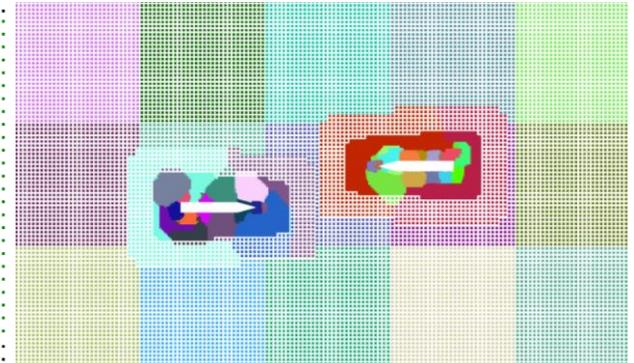
<병렬화 모듈 구조>



배경 질점계



이동 질점계



전체 질점계

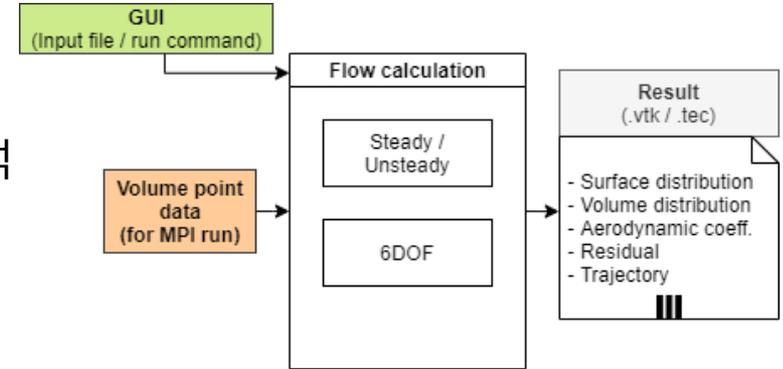
<해석 질점 병렬화>

# FAMUS 구성 및 기능

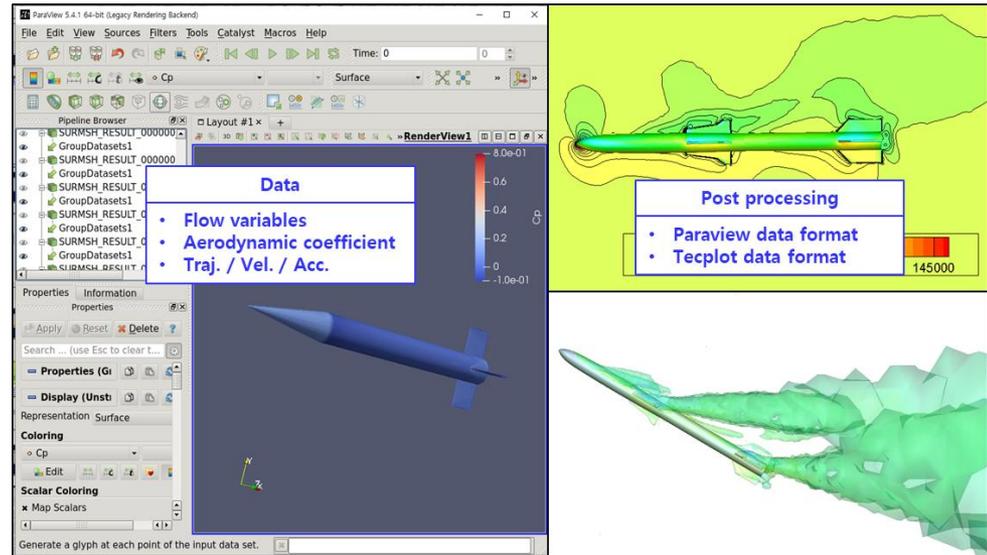
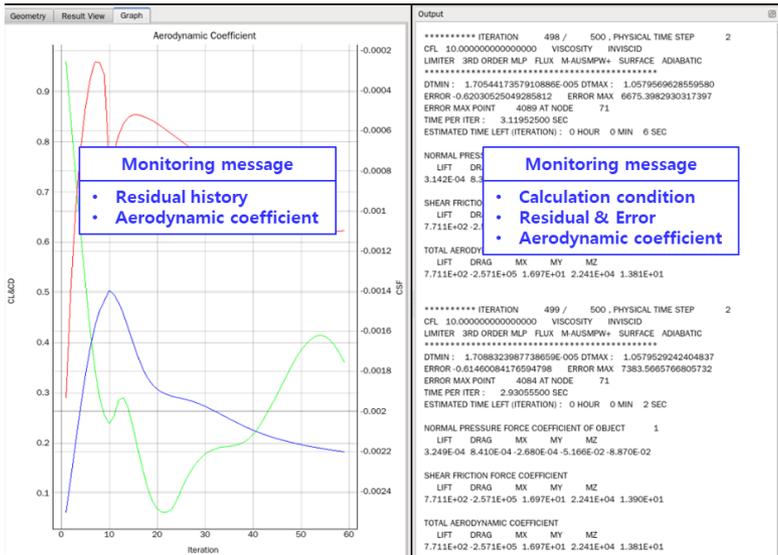
## • FAMUS Solver

### ■ 유동 해석 모듈

- 정상 / 비정상, Euler / Turbulence 유동 해석
- 6DOF / 이동 / 변형 물체 해석
- 해석 결과 파일 출력 (Tecplot / Paraview)
  - 표면 유동 분포, 공간 유동 분포
  - 공력계수, Residual
  - 궤적 / 자세



<유동 해석 모듈 구조>



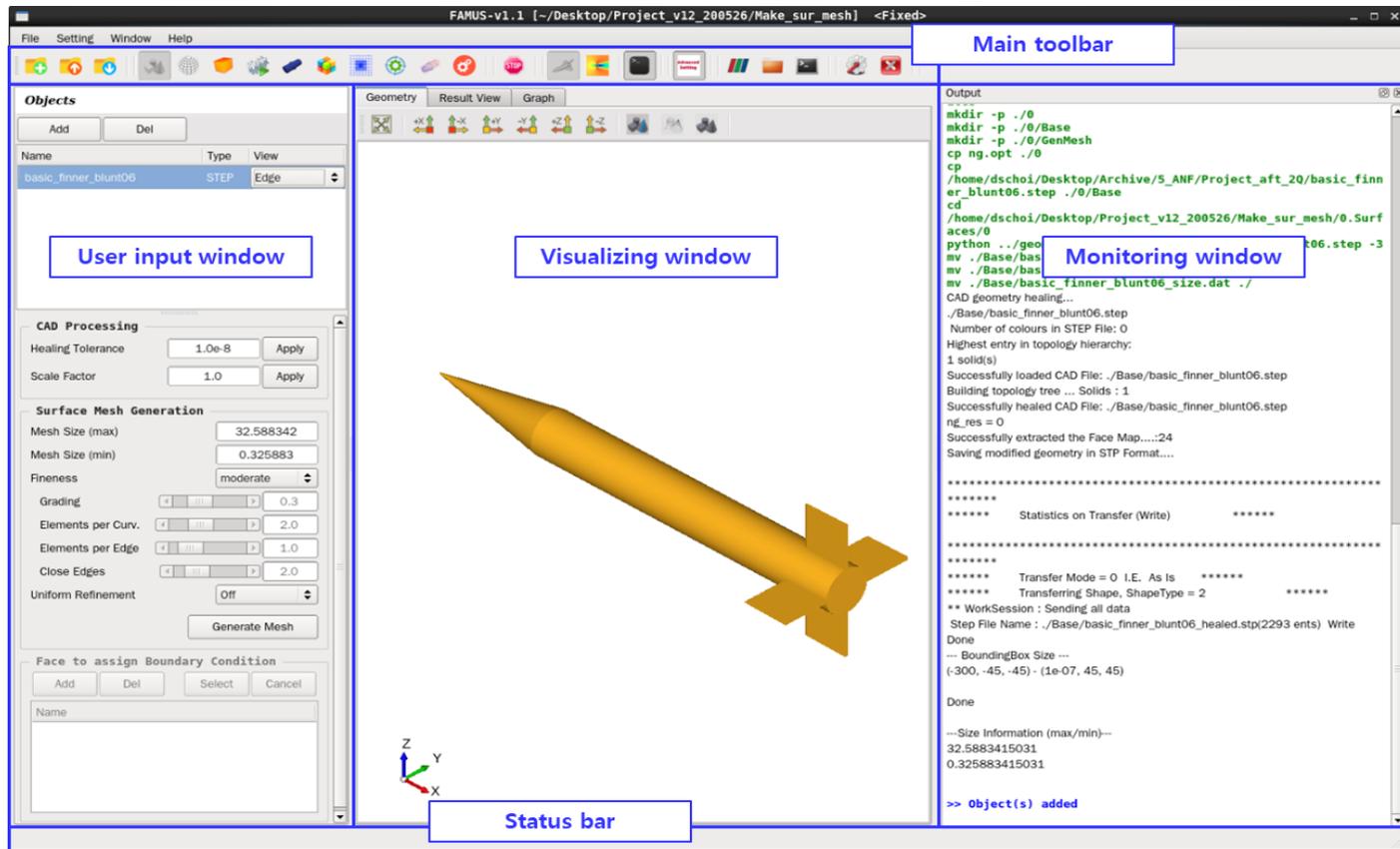
<해석 결과 출력>

# FAMUS 구성 및 기능

- FAMUS GUI

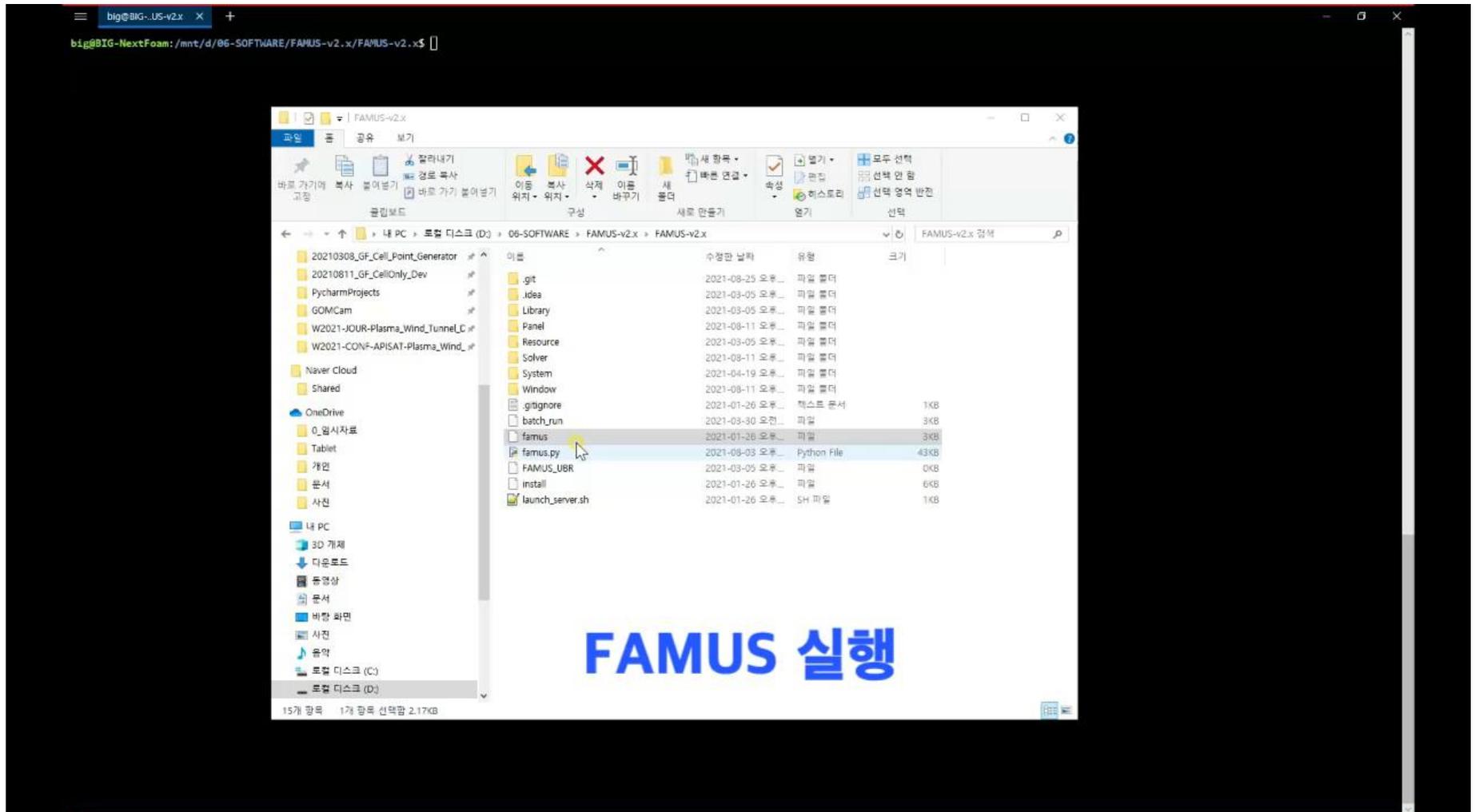
- FAMUS 메인 화면 구성

- Main toolbar, User input window, Visualizing window, Status bar, Monitoring window



<FAMUS GUI 구성>

# 시연 동영상



# Validation & verification

## • 압축성 유동 해석 솔버 검증

- 솔버 정확도 / 프로그램 동작 / 편의성 등 확인을 위해 주요 검증 문제 해석
- 과제 관련 BMT
- 유동 해석 솔버 검증에 주로 사용되는 대표적인 3D 해석 문제 선정

### < FAMUS BMT 리스트 >

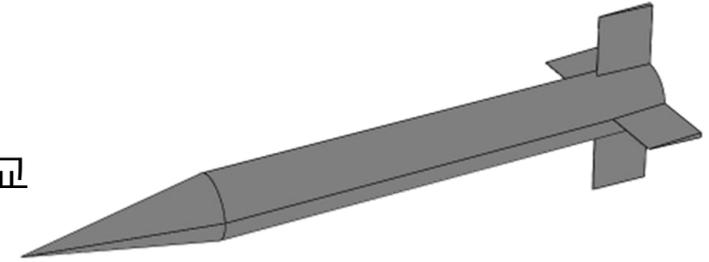
검증문제	유동조건	질점계	검증 요소
Basic Finner	M 2.5 AOA ~ 10	고정질점	<ul style="list-style-type: none"><li>• Fin 4개 가 부착된 전형적 미사일 형상</li><li>• 공력계수 / 정적, 동적 특성</li></ul>
IRIS-T	M 2.0 AOA ~ 20	고정질점	<ul style="list-style-type: none"><li>• 정교하게 모델링된 Wing / Fin이 결합된 미사일 형상</li><li>• 공력계수</li></ul>
Sparrow	M 1.5 AOA ~ 35	고정질점	<ul style="list-style-type: none"><li>• Wing / Fin 결합된 미사일 형상</li><li>• 공력계수</li></ul>
ONERA M6	M 0.84 AOA 3.06	고정질점	<ul style="list-style-type: none"><li>• 대표적인 천음속/초음속 유동 검증 문제</li><li>• 공력계수 / 표면압력분포 / Lambda shock</li></ul>
Moving Sphere	M 2.0	이동질점	<ul style="list-style-type: none"><li>• 동일한 상대속도를 가지는 다양한 조건에서 유동해석</li><li>• ALE 방정식 / 이동질점계</li></ul>
Eglin	M 0.95	다물체 / 이동질점	<ul style="list-style-type: none"><li>• 날개 / 파일런 / 무장이 결합된 무장분리 검증 문제</li><li>• 6DOF 운동방정식 / 무장 분리 궤적 / 표면압력분포</li></ul>

# 미사일 형상 해석

## • Basic Finner

### ■ 개요

- 동체에 Fin 4개가 부착된 대표적 형상
- 풍동실험<sup>[1]</sup>과 FAMUS 난류 해석 공력계수 비교



### ■ 유동조건

- 마하수: 2.5
- 레이놀즈 수:  $3.0 \times 10^6$
- 받음각:  $-10^\circ \sim 10^\circ$

### < Freestream value >

Freestream value	Value
T [K]	250
Viscosity (Sutherland) [kg/m-s]	1.59905E-05
Density [kg/m <sup>3</sup> ]	0.20176
Pressure [Pa]	14483.82

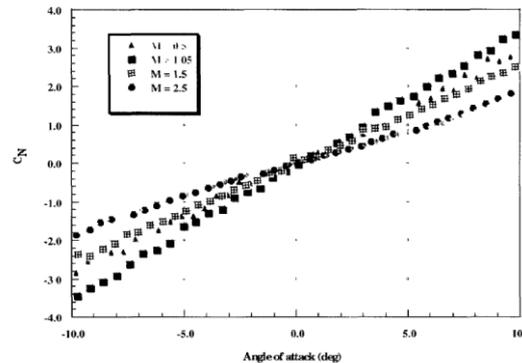


Figure 26 - Normal force coefficient vs. incidence

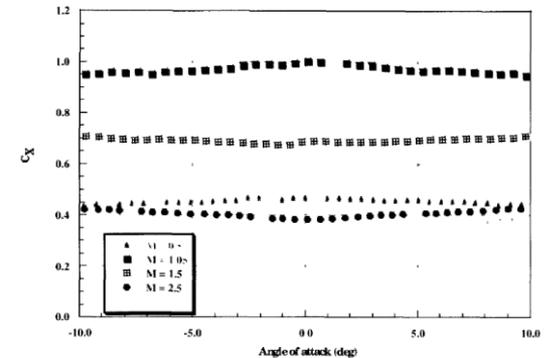


Figure 25 - Axial force coefficient vs. incidence

### < Experimental data, CN, CX vs. incidence >

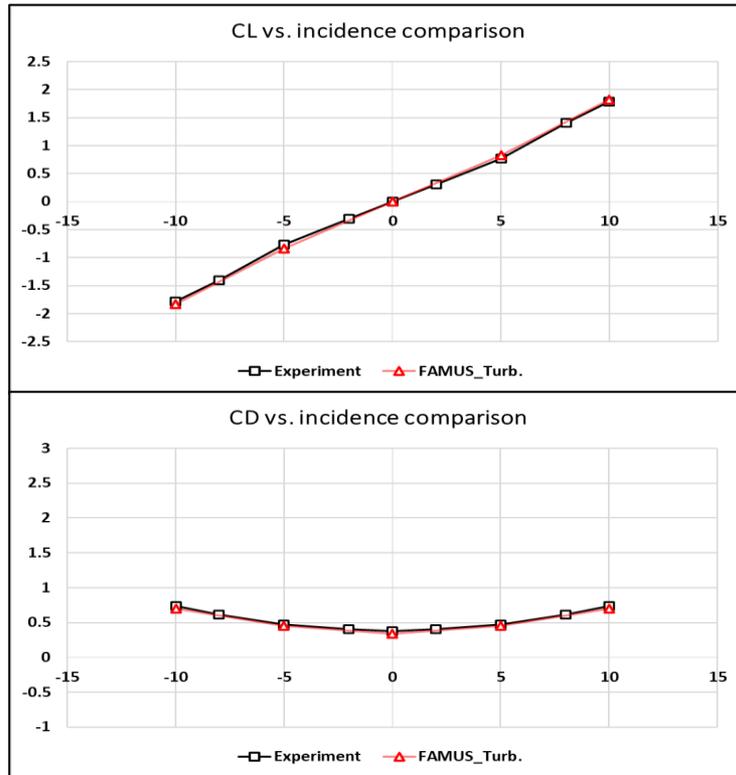
[1] Dupuis, A. Aeroballistic range and wind tunnel tests of the basic finner reference projectile from subsonic to high supersonic velocities. Defense Research and Development, Canada: Valcartier (QC); 2002. TM-2002-136.

# 미사일 형상 해석

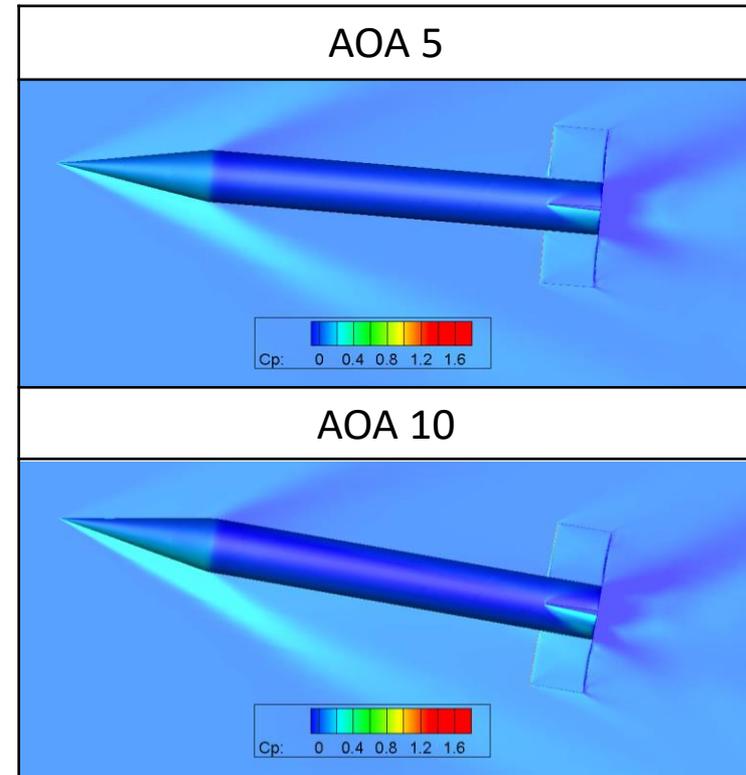
## • Basic Finner

### ■ 해석 결과

- CL: 실험값 대비 오차 대체로 8% 이내
- CD: 실험값 대비 오차 대체로 6% 이내, 최대 11%



< CL, CD vs. AOA >



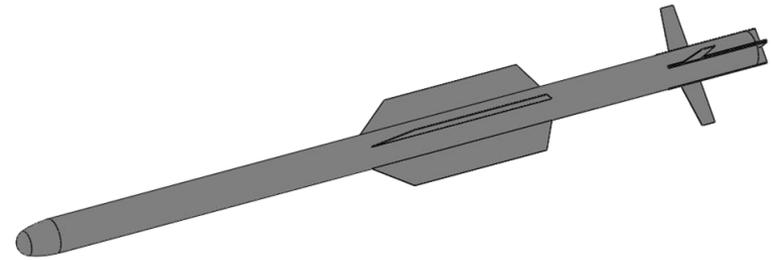
< Pressure contour >

# 미사일 형상 해석

## • IRIS-T

### ■ 개요

- 단거리 공대공 미사일 형상
- 동체에 4개의 Wing과 Fin이 부착된 형상
- OpenFOAM과 FAMUS Euler 해석 결과 비교



### ■ 유동조건

- 마하 수: 2.0
- 레이놀즈 수:  $3.0 \times 10^7$
- 받음각:  $-20^\circ \sim 20^\circ$

	FAMUS	OpenFOAM
Element generation	Self point gen. code	cfMesh
Flux scheme	M-AUSMPW+	Roe
Limiter	MLP 3 <sup>rd</sup>	Venkatakrishnan
Time integration	LU-SGS	LU-SGS
Turbulence model	k- $\omega$ SST	k- $\omega$ SST

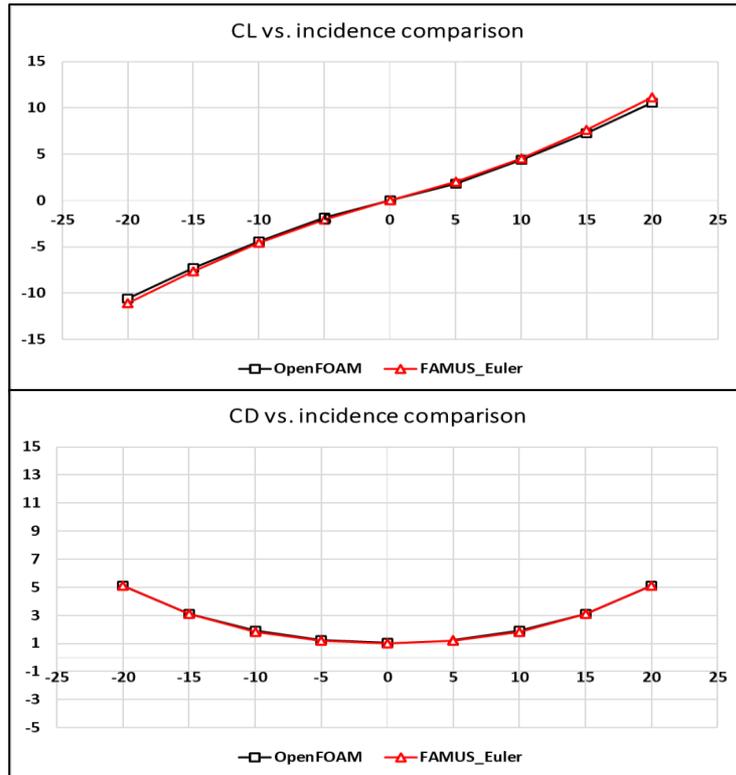
< Solver condition >

# 미사일 형상 해석

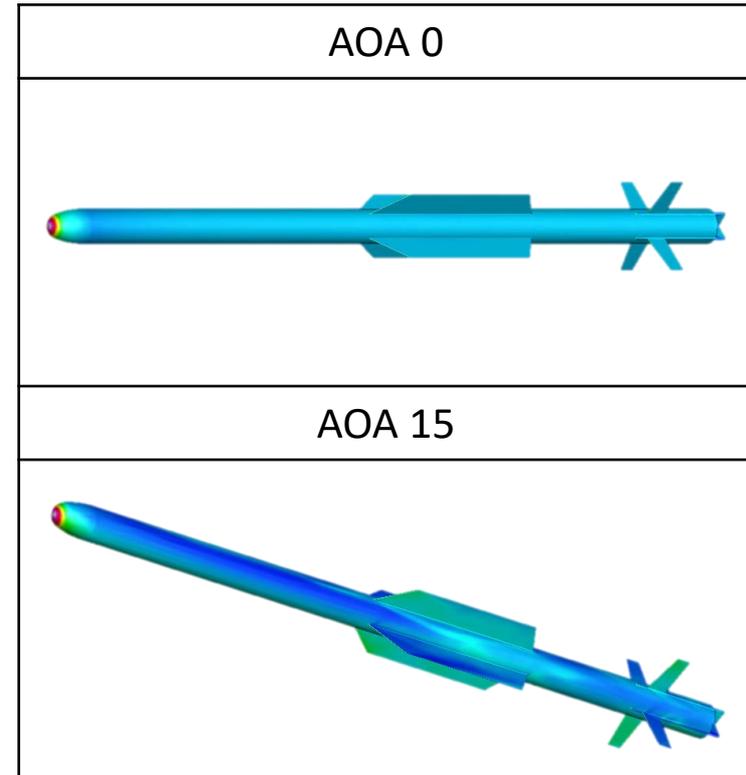
## • IRIS-T

### ■ 해석 결과

- CL: OpenFOAM 대비 오차 대체로 5% 이내, 최대 10%
- CD: OpenFOAM 대비 오차 대체로 4% 이내



< CL, CD vs. AOA >



< Surface pressure contour >

# 미사일 형상 해석

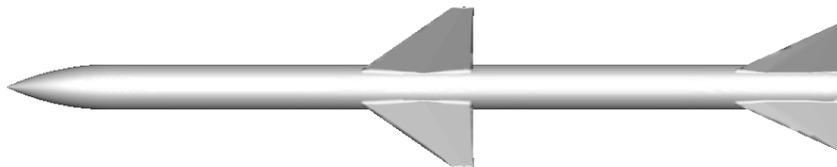
## • Sparrow Missile

### ■ 개요

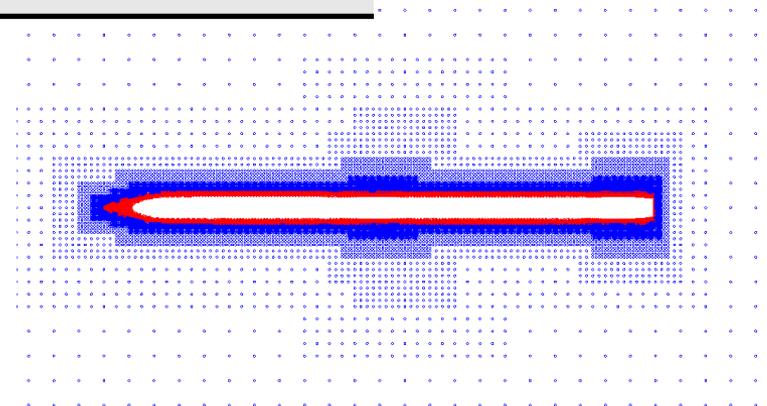
- 초음속 유동 내에서의 미사일 형상 해석을 검증하기 위한 대표적인 문제
- 난류를 포함한 **유동 해석** 결과 **검증**
- 실험 결과 뿐만 아니라, 다양한 유동 해석자 계산 결과 존재
  - “Prediction Capabilities and comparison of Panel, Semi-empiric and CFD Codes for Missile Aerodynamic Analysis”

### ■ 유동조건

$M_\infty$	p(kPa)	T(K)	$Re_{unit}$
1.5	18.1148	233.793	$8.19 \times 10^6$



model



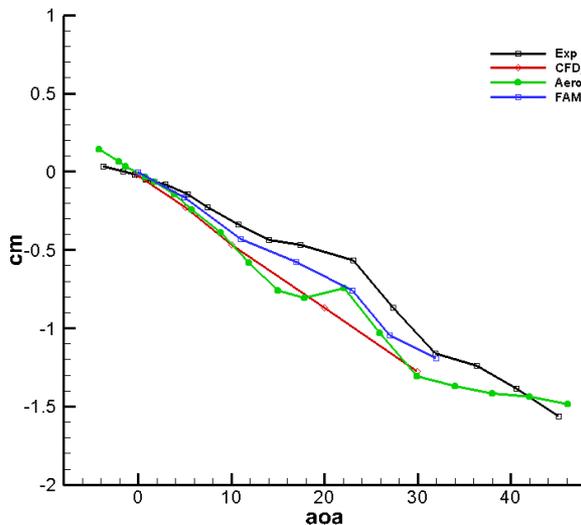
Point Distribution around missile

# 미사일 형상 해석

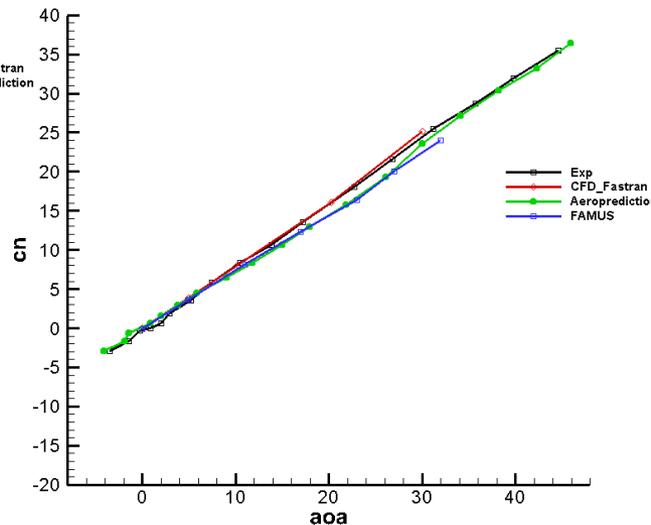
## • Sparrow Missile

### ■ 해석 결과

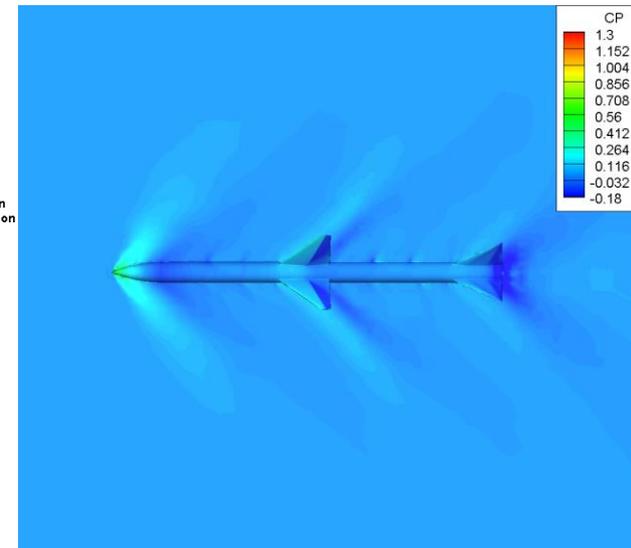
- 공력계수를 실험값 및 기존 CFD 결과와 비교
  - “Prediction Capabilities and comparison of Panel, Semi-empiric and CFD Codes for Missile Aerodynamic Analysis”
- 넓은 범위의 AOA 변화에 따른 계수들의 값의 정확도 확인
  - $C_A$  : 약 8% 이내의 오차
  - $C_N$  : 약 3% 이내의 오차
  - $C_M$  : 약 7% 이내의 오차



<Normal force coefficient>



<Pitching moment coefficient>



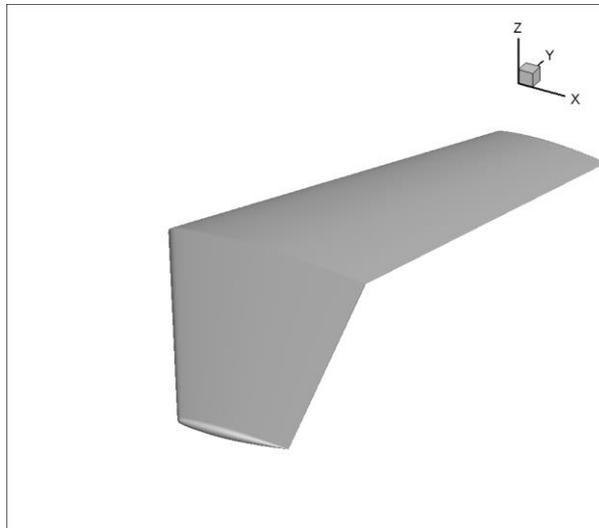
<Pressure coefficient contour>

# ONERA M6 Wing

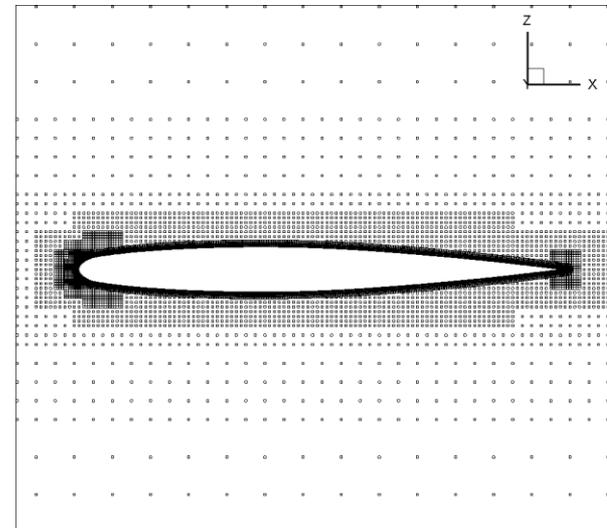
## • 개요

- 대표적인 유동 해석 검증 문제
  - 간단한 geometry & 복잡한 천음속 유동
  - **아음속 / 천음속 / 초음속 영역이 번갈아가며 존재**
  - **Lambda shock capturing**
- 유동 조건

Operation condition	자유류 속도(Ma)	Re	받음각
	0.8395	11.4M	3.06



<Onera M6 wing surface>

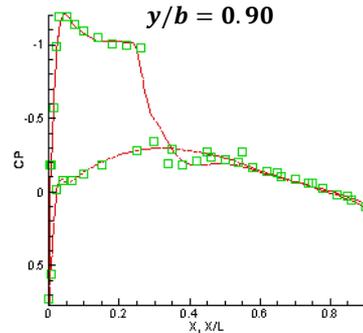
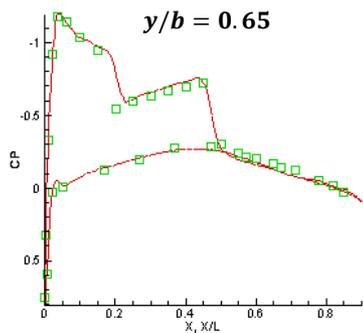
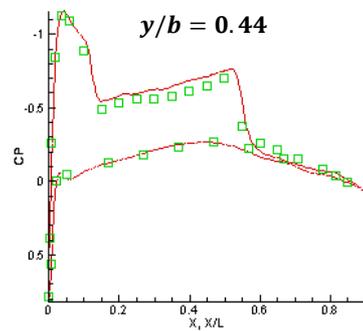
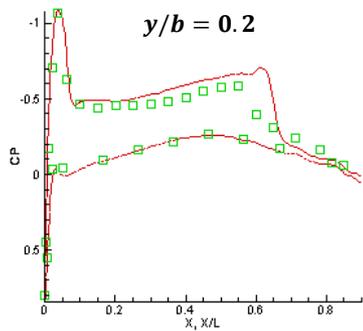


<Point Distribution for Onera M6 wing>

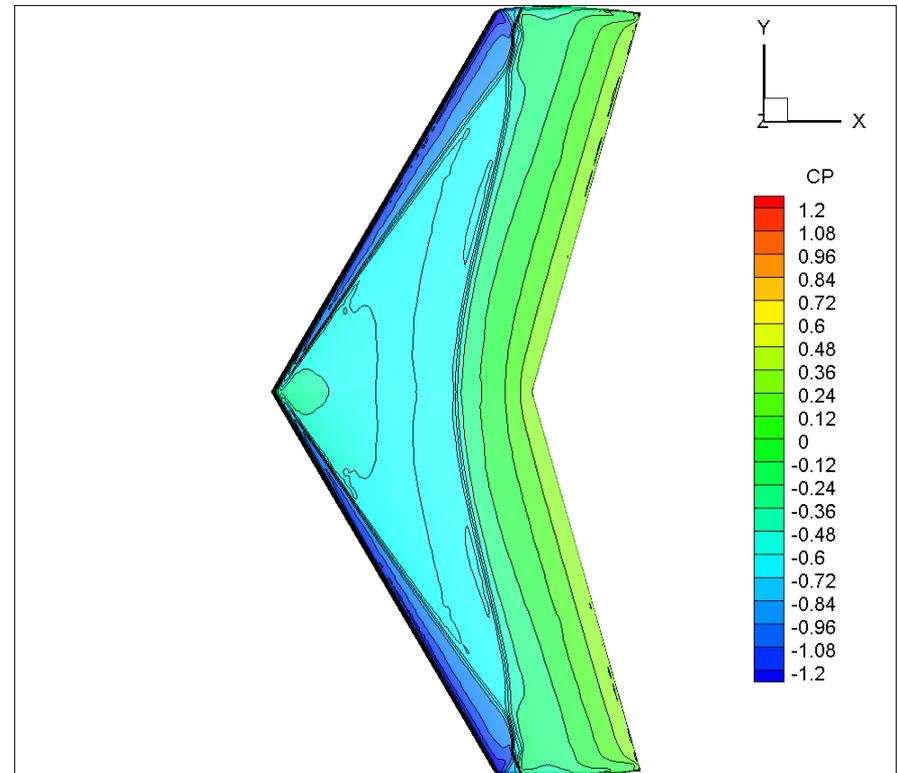
# ONERA M6 Wing

## • 해석결과

- NASA NPARC 및 다른 해석 솔버 결과와 비교
  - 표면 압력 계수 분포를 통한 충격파 위치와 강도 확인
  - Lambda shock 포착



<Pressure coefficient of Onera M6 wing>

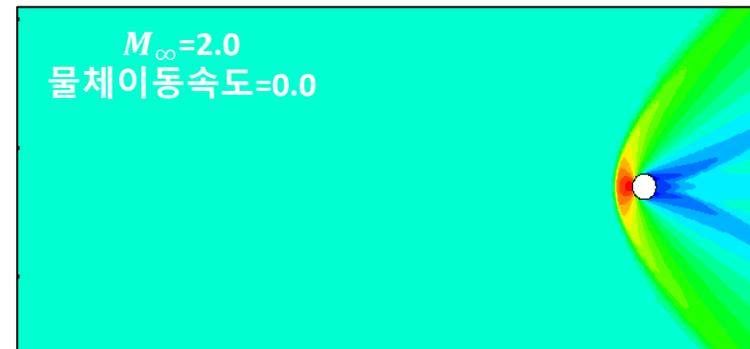
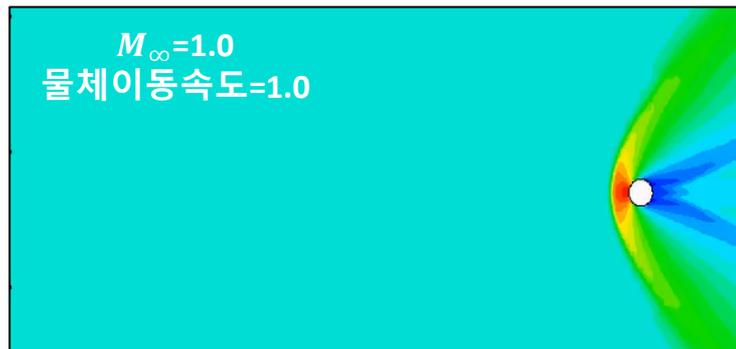
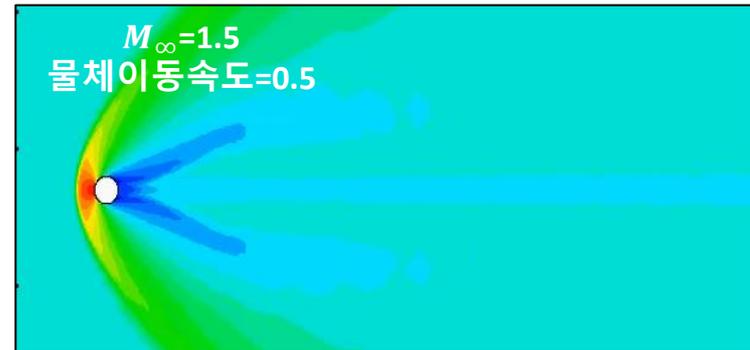
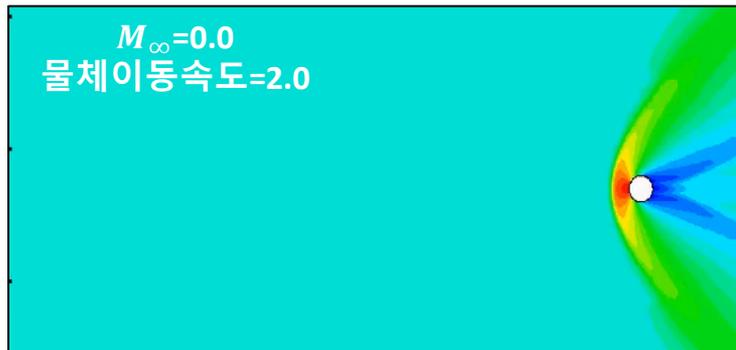


<Pressure coefficient contour>

# Moving Sphere

- 개요

- 물체 기준 동일한 자유류 속도 (Mach 2)를 가지는 sphere
- 주요 확인 요소
  - 이동물체 해석
  - ALE(Arbitrary Lagrangian Eulerian) equations 적용

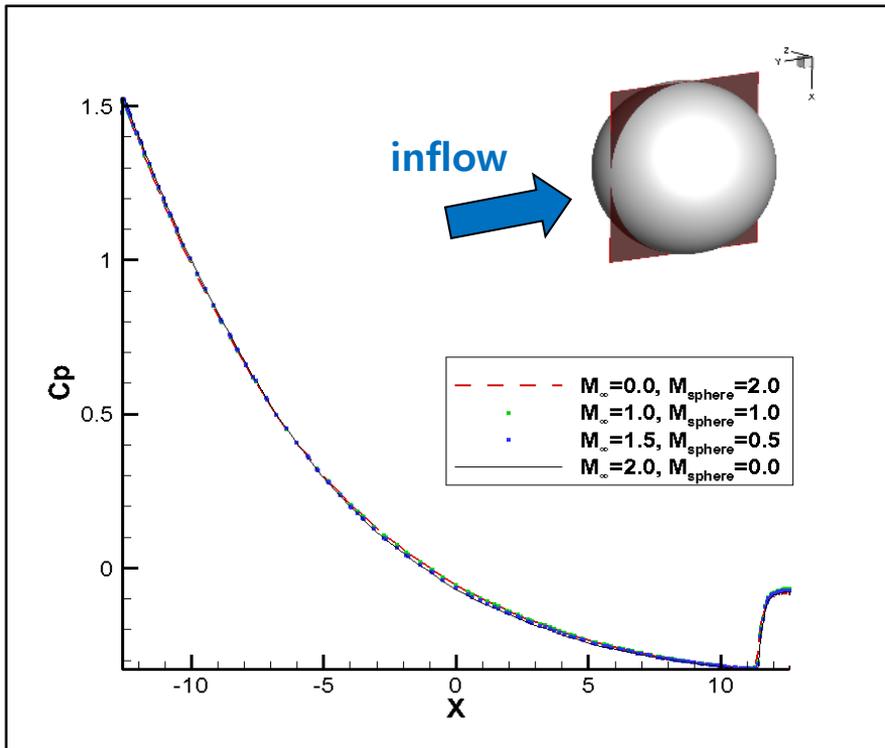


< 해석 케이스 별 압력분포 >

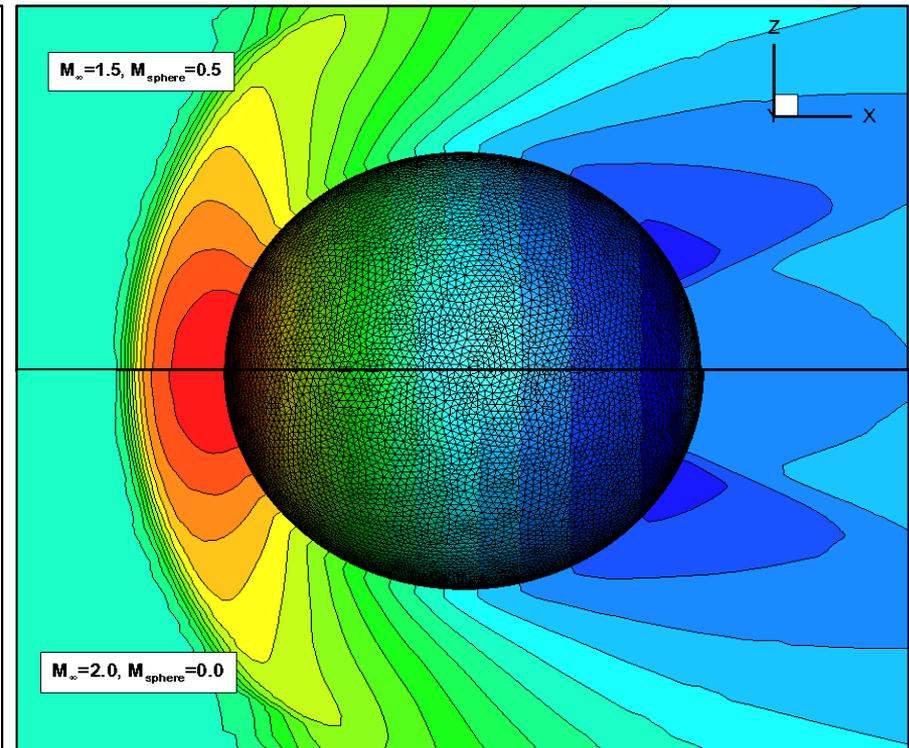
# Moving Sphere

## • 해석결과

- 이론적으로 타당한 결과 획득
  - 표면을 따른 pressure coefficient 비교
  - Sphere 주위의 pressure contour 비교



< 표면 압력계수 비교,  $z=0$  >

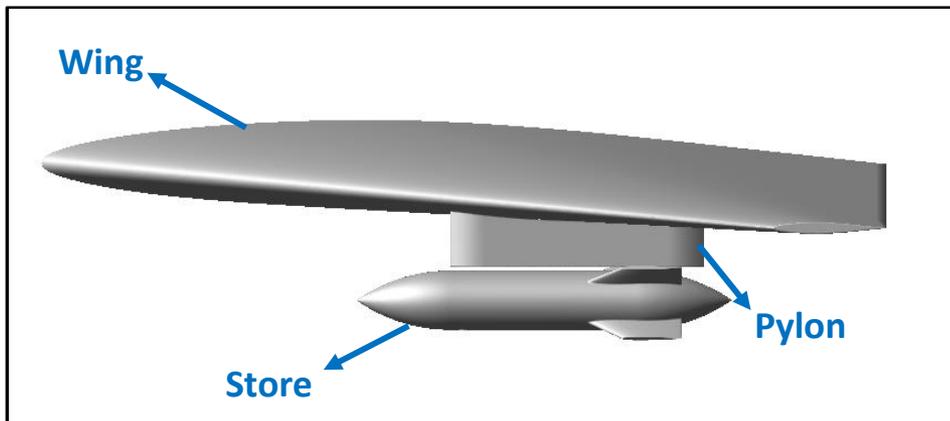


< 압력계수 분포 비교 >

# EGLIN Store Separation

## • 개요

- 이동 물체의 궤적 해석을 검증하기 위한 표준 무장 분리 모델
  - Arnold Engineering Development Center에서 1991년에 시행한 실험
  - 유동 해석과 **6자유도 방정식 해석 검증**
  - $t = 0, t = 0.17$  시점에서 표면 압력 계수 실험값과 비교
  - 무게중심 위치, 자세각 변화 실험값과 비교



<유동 해석 형상 모델>

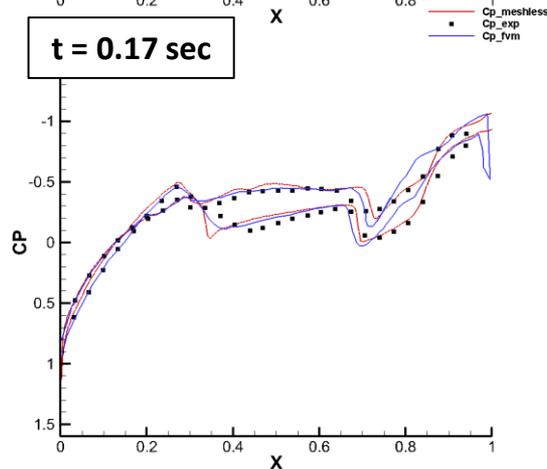
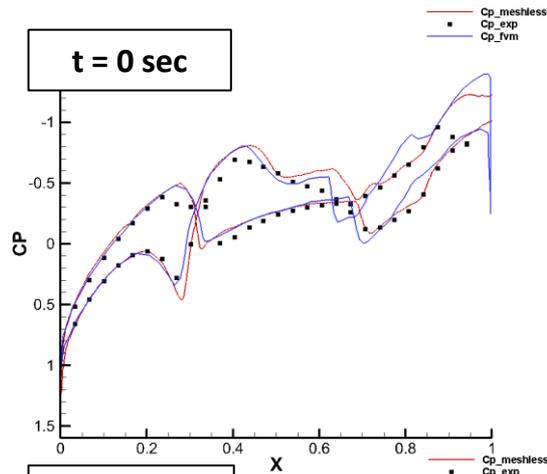
## <자유류 유동 조건>

Flow condition
$M_{\infty} = 0.95$
$P_{\infty} = 35988.8Pa$
$T_{\infty} = 236.639K$

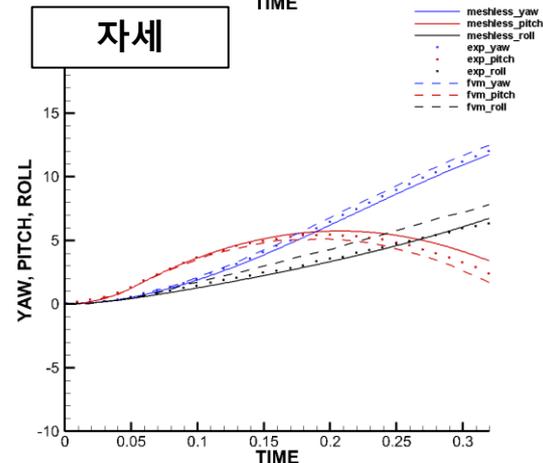
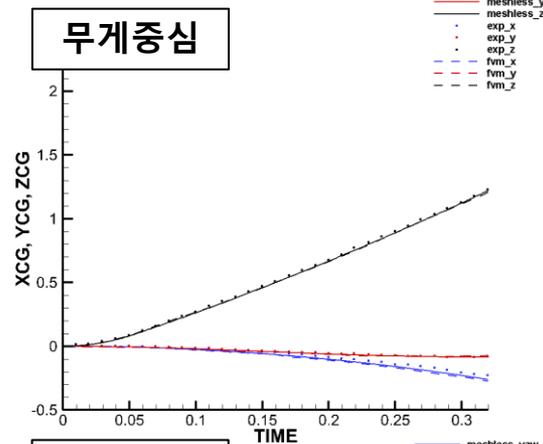
# EGLIN Store Separation

## • 해석 결과

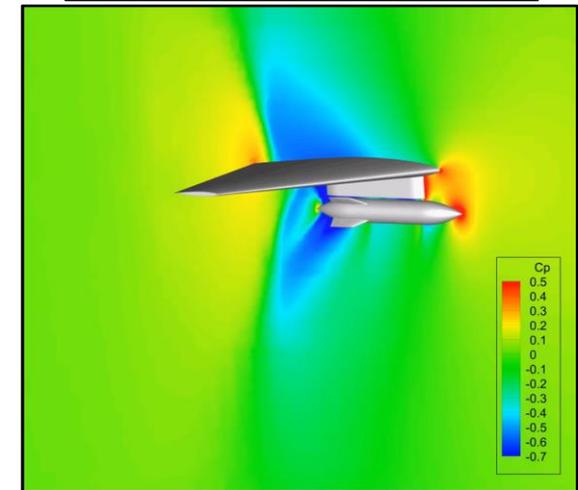
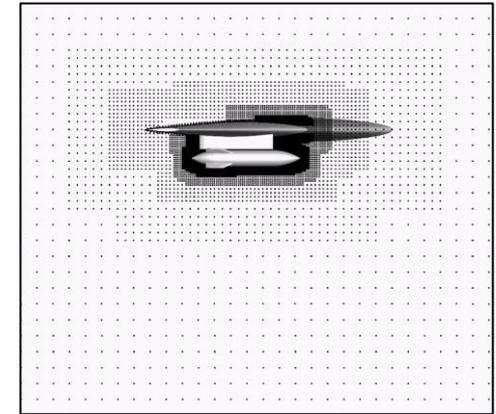
- Store의 표면 압력 계수, 궤적을 타 CFD 결과, 실험 결과와 비교



<압력계수 분포>



<시간에 따른 궤적 및 자세>

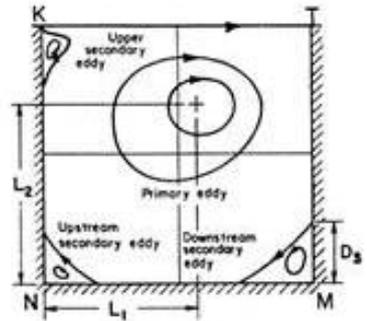


<압력계수 분포, y=0>

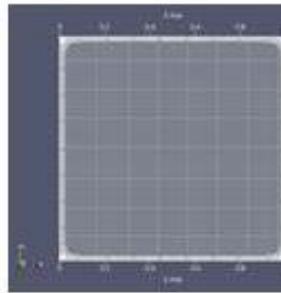
# 비압축성 유동 해석 – Validation Test

**Driven cavity**

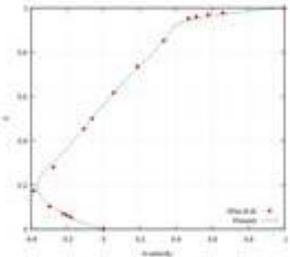
- 2차원 비압축성 유동
- $Re=1000$ 로 설정하여 해석을 진행 (steady-state)
- Centerline velocity profile 비교



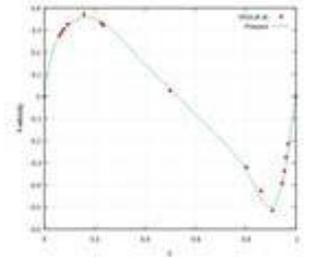
유동 특징



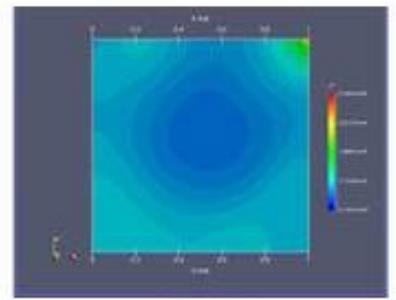
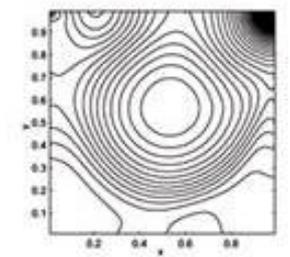
질점계 분포



X방향 속도 비교



Y방향 속도 비교

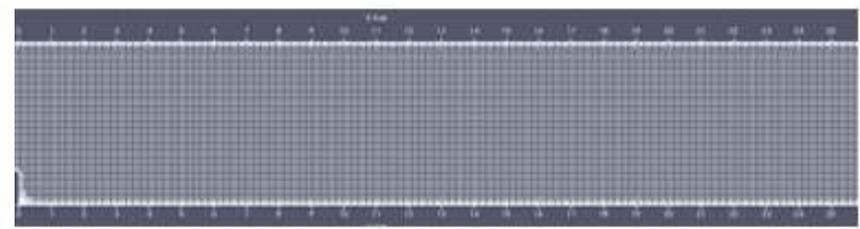


**난류 후방 계단 유동**

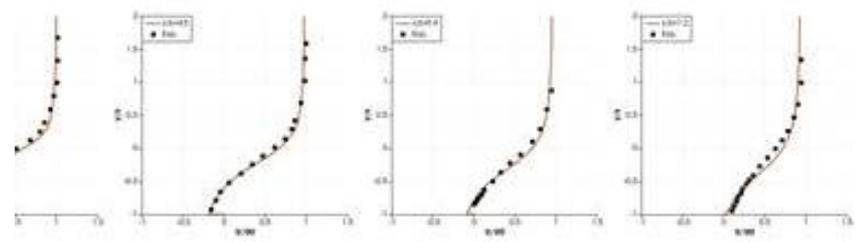
- $Re = 28000$  (계단높이  $s$  기준)
- Expansion ratio ( $H/h$ ): 1.25
- 입구 ( $x=8s$ ) 조건 :  $U$ =power law profile ( $n=1/7$ ),  $V=W=0.0$
- $k-\omega$  SST Model 적용



schematic diagram



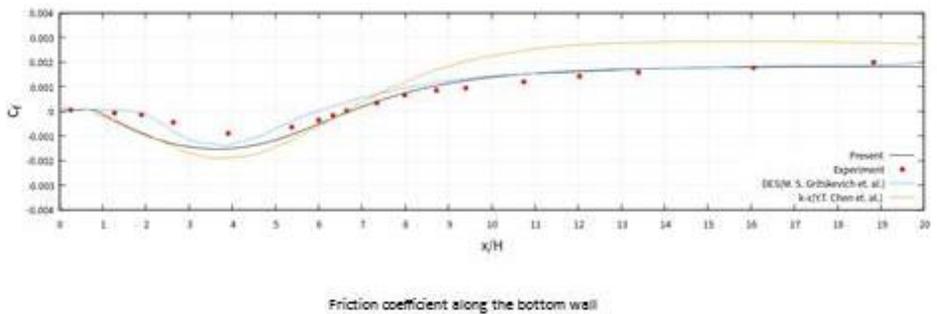
공간 질점 분포 (37,099 points)



X방향 속도 분포 비교

# 비압축성 유동 해석 – Validation Test

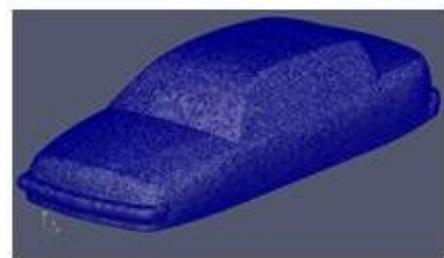
## ▪ 난류 후방 계단 유동



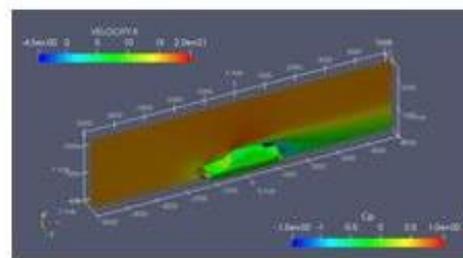
## ▪ 자동차 외부 유동 해석

- $Re = 1.0 \times 10^6$
- 표면질점수 : 78,451
- 공간질점수 : 2,621,599
- k- $\omega$  SST Model 적용

항력 계수	
FLUENT	PAMUS
0.1051	0.1038



표면밀점

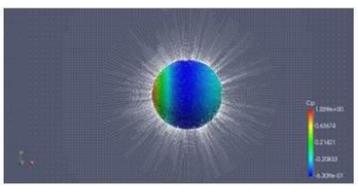


속도분포 및 표면 Cp 분포

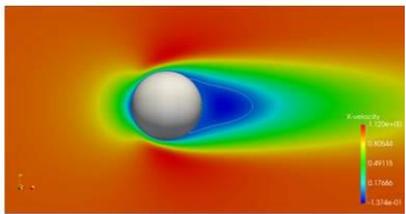
## ▪ 구 주위 층류 유동 해석

- $Re = 100$  (구 직경 D 기준)
- 표면 질점 수 : 13,235, 공간 질점 수 : 1,174,689
- 입구 조건 ( $x=50D$  평면) :  $U=1.0, V=W=0.0$

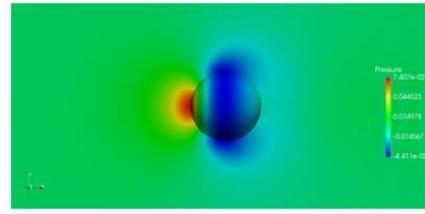
- 기존 문헌(Fornberg, 1988), FLUENT 해석과 구 표면 압력 계수 비교



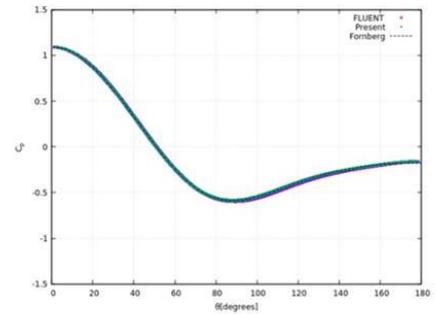
공간 질점 분포



X-velocity contour



구 표면 및 z=0 평면 압력 분포



구 표면 압력 계수 비교

# 연구 개발 사항

- 해석 솔버에 맞춰 신규 솔버 적용 / 기능 확장
  - 현재 steady/unsteady, multi-objects, 6DOF, 이동 물체 해석 반영
  - 개선된 알고리즘, 확장된 해석 솔버 / 다양한 경계조건 적용 및 검증
- 후처리 기능 보강
  - 현재 유동분포, 공력계수, 잔차 가시화 → Tecplot, Paraview를 통해 고도화된 후처리 대응
  - 프로그램 내 slice, streamline 등 기능 구현 중
    - 질점 데이터 → 볼륨 데이터 생성 알고리즘
    - 효율적인 GUI 구동 방식 / 라이브러리 구축
- 사용자 가이드
  - 다소 생소한 무격자 기반 사용자 입력값에 대한 가이드
  - 사용자 매뉴얼 / 튜토리얼
- Windows OS 확장
  - 현재 Linux 기반 프로그램 환경
  - Windows에서 사용하기 위해서 별도의 방법 사용 (WSL, Docker 등)
  - Windows 에서 사용 가능하도록 확장

경청해 주셔서 감사합니다.