

PIMPLE 알고리즘 기반 프로펠러 설계 프로세스에 대한 고찰: 실패 사례와 극복 방안

김건홍

니나노컴퍼니

2024 11th OpenFOAM Korea Users' Community Conference

2024.09.26.

제 공

KT ENGINEERING PLATFORM

금오공대 슈퍼컴퓨팅 센터

BARAM 화이팅

문의처

KT 엔지니어링 플랫폼: KT 백두현 팀장님
금오공대 슈퍼컴퓨팅 센터: 금오공대 조금원 교수님
일반 문의: 넥스트폼 이보성 박사님

〈이 발표에서 다루는 내용〉

프로펠러 설계를 위한 OpenFOAM 셋업 방법과 사례

OpenFOAM Solver의 안정성 개선 방법

PIMPLE 알고리즘 사용 시 주의 사항

항공기 설계 & 제작 기술 기반의 Global No.1 UAS Solution Provider로 성장



Core Competitiveness



독보적인 항공기 설계 기술



국내 자체 제작 기술



풍부한 파트너십과 인프라



무인항공기
(멀티콥터, 고정익, VTOL)



연계 시스템
(스테이션, 플랫폼)



무인항공기 부품
(전자장비, 프로펠러)

항공기 설계 기술



공력 최적 설계



경량 구조 설계



고성능 컴퓨팅 시뮬레이션



항공 전자 & S/W

Strategy



산·학·연 협력 강화



적극적인 국내외 실증 & PoC



개발 기술 및 제품의 해외 진출



프로펠러 설계

왜 프로펠러 설계가 필요한가?

서로 다른
수직 vs 수평
비행 시 요구도

2-blade 위주의
상용 프로펠러

저소음 고효율

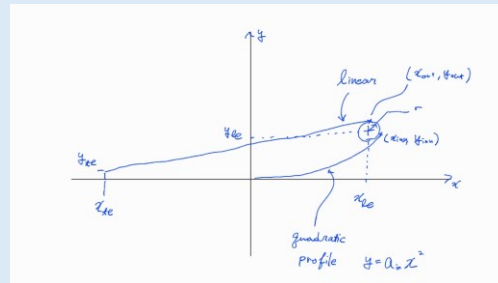
프로펠러 설계 프로세스

Reverse Engineering



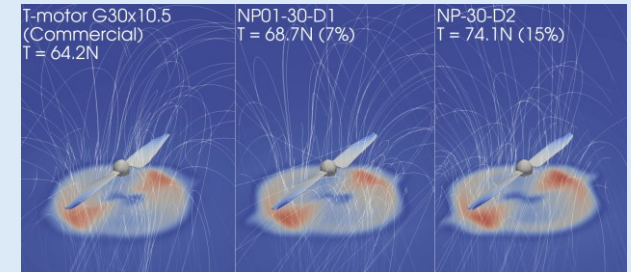
- 상용 추진기 성능 평가
- 상용 프로펠러와 추진기 선정
- 3차원 스캐닝을 통한 형상 정보 획득
- 실험을 통한 프로펠러 성능 계측
- 전산 수치 해석 기법에 대한 적정성 평가

Parameterization



- 프로펠러 설계 파라미터 설정
 - Chord/pitch distributions
 - Airfoil 단면 형상
 - Skew, Up/downwash
- 설계 수정을 통한 형상 결정

Analysis



- Potential flow code (XROTOR)
- CFD Analysis
 - Thrust/Torque
 - Acoustics
- Tools
 - OpenFOAM
 - STAR-CCM+

해석 방법

1. MRF Simulation

```

solver    simpleFoam.n3
Interface cyclicAMI
RASModel kOmegaSSTN
    
```



2. Rotating Mesh Simulation

```

solver    pimpleFoam.n3
interface cyclicAMI
dynamicFvMesh dynamicMotionSolverFvMesh
RASModel kOmegaSSTN
    
```

Additional Treatments (numerical)

- Unphysical velocity clipping
- Diagonal dominance of the matrix
- Rhie-Chow interpolation
- Realizable limiter for shear rate tensor
- Limiter on production term & turbulent viscosity
- Curvature correction

Additional Treatments (numerical)

- Transimple

참고자료

- ADLib github: <https://github.com/geonhong/ADLib.git>
- NASA turbulence modeling resource: <https://turbmodels.larc.nasa.gov/sst.html>

Computational Domain & Boundary Conditions

Pre-processing

Rhinoceros 6

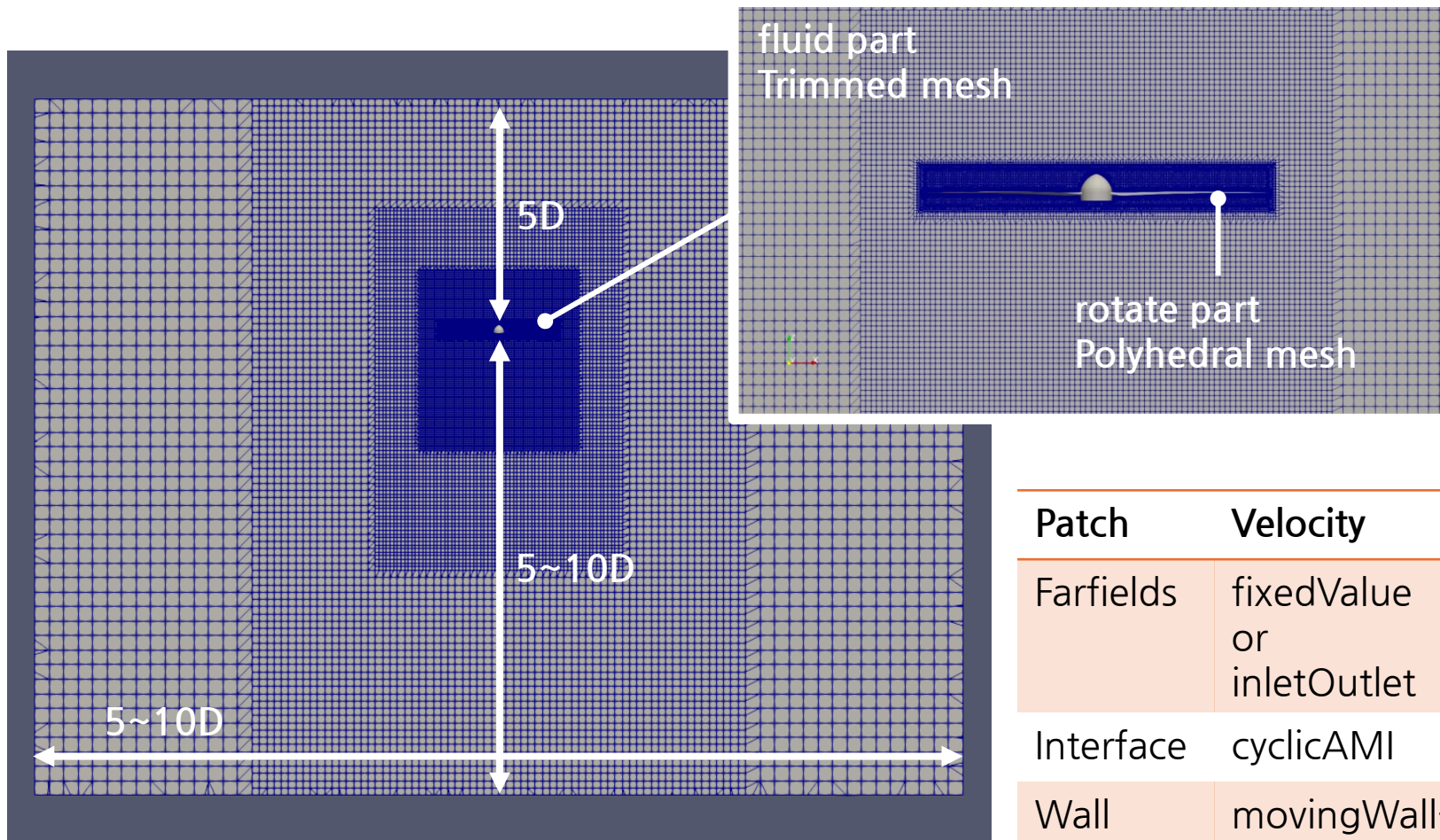


Meshing



Solver

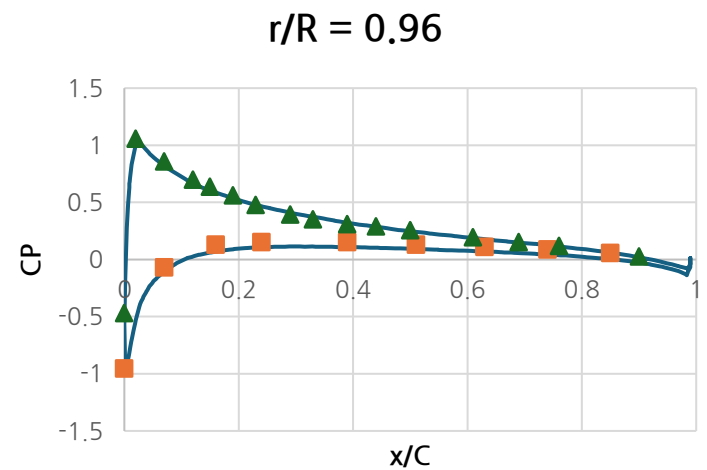
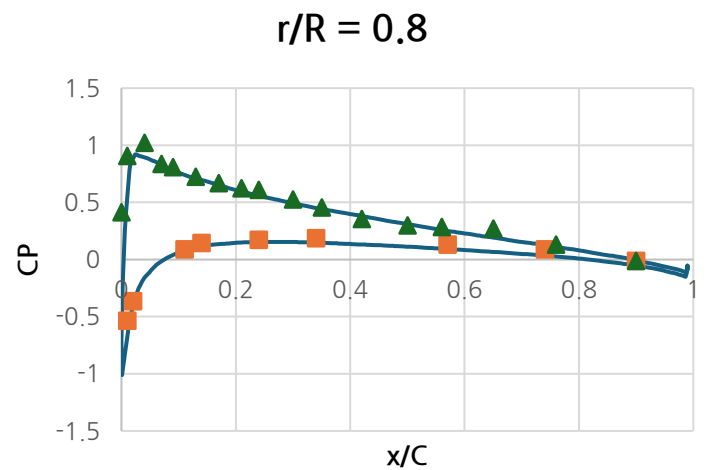
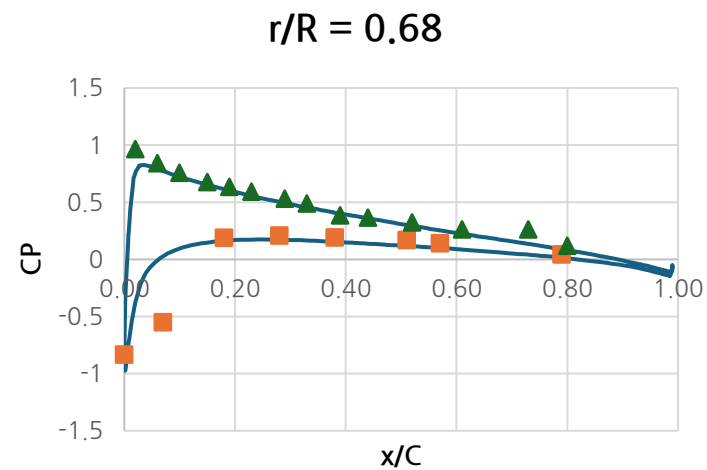
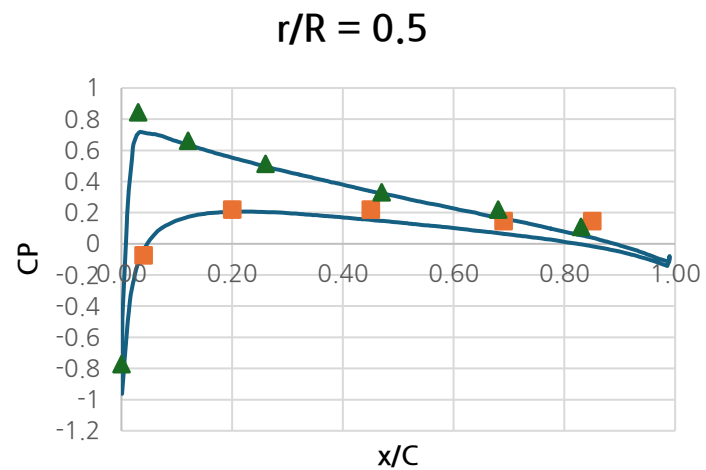
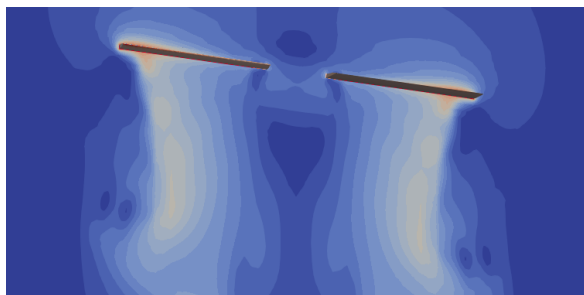
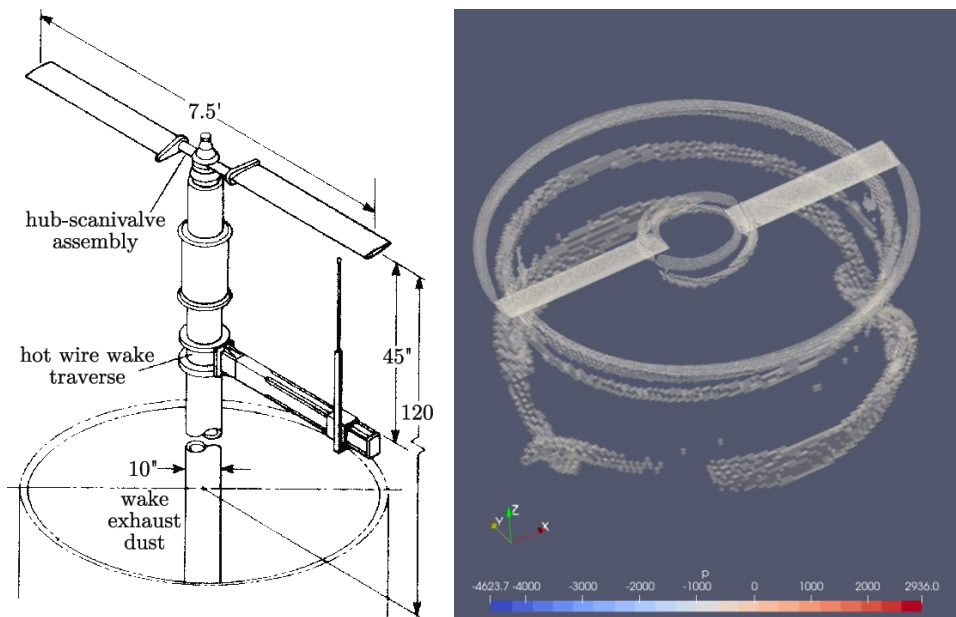
OpenFOAM®



Patch	Velocity	Pressure
Farfields	fixedValue or inletOutlet	zeroGradient
Interface	cyclicAMI	cyclicAMI
Wall	movingWall- Velocity	fixedFlux- Pressure

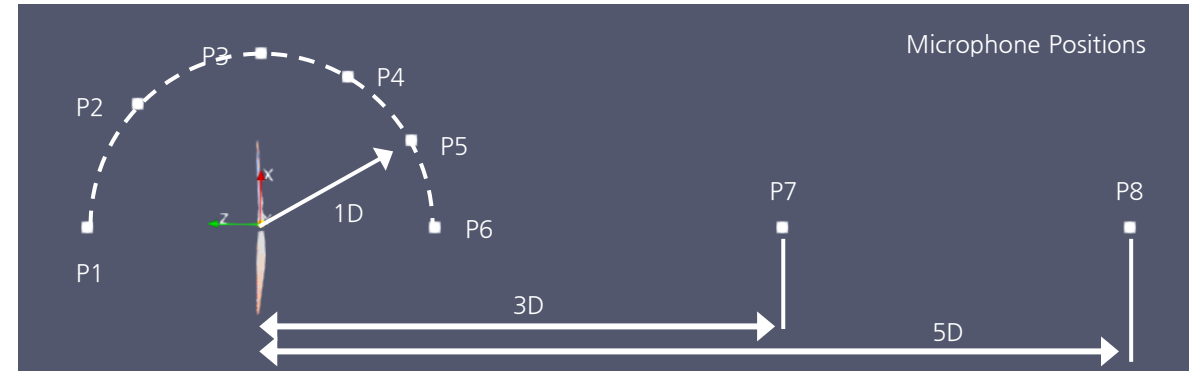
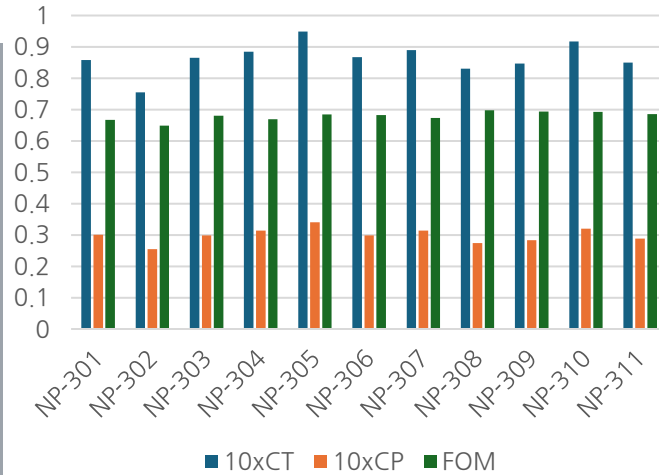
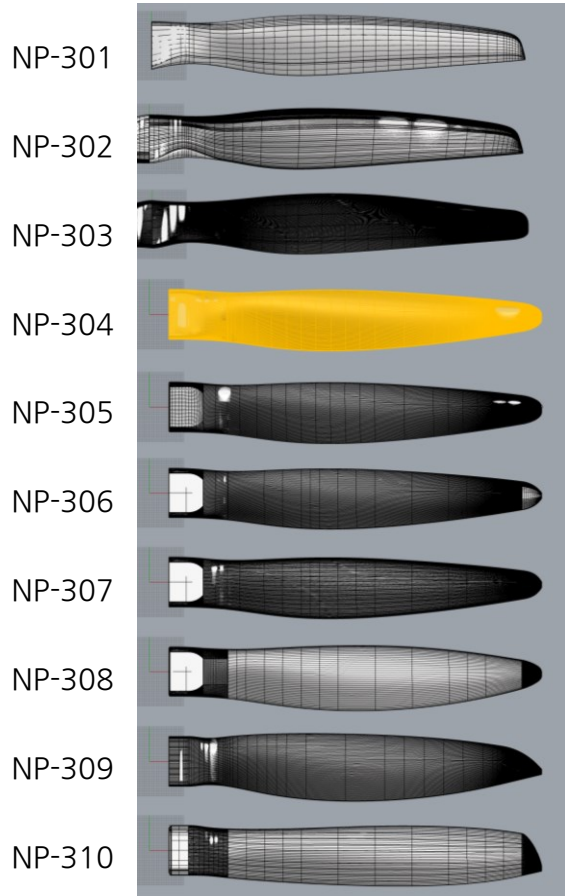
Computational Domain

Validation: Caradona-Tung Case

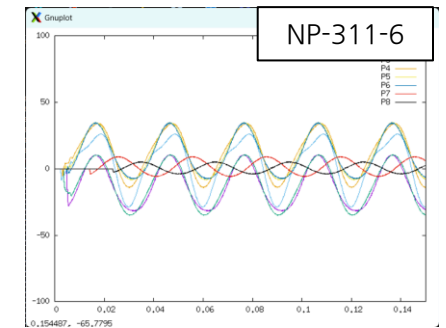
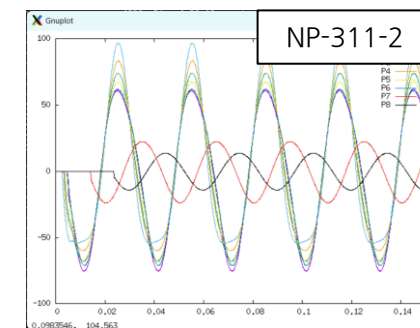
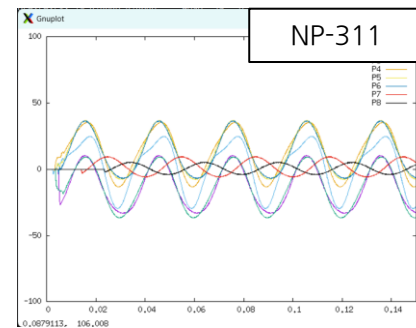


Design Case: Low Noise Propeller (100kgf)

공력 해석 + Acoustics 해석



Pressure fluctuation (acoustics)

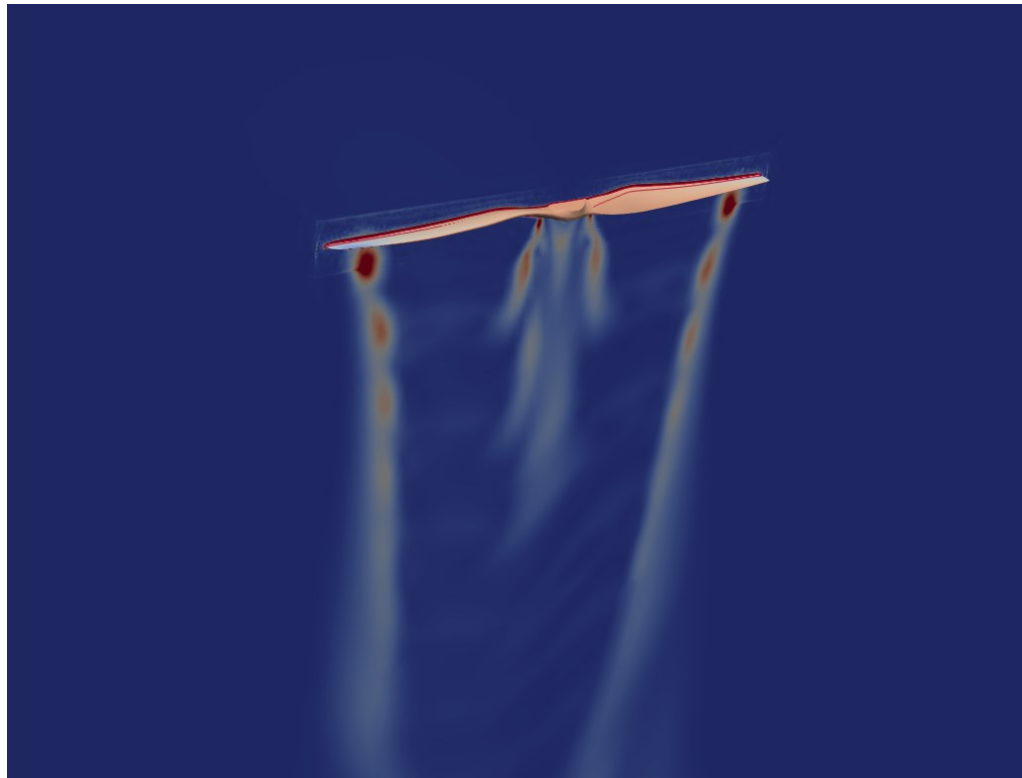


참고자료

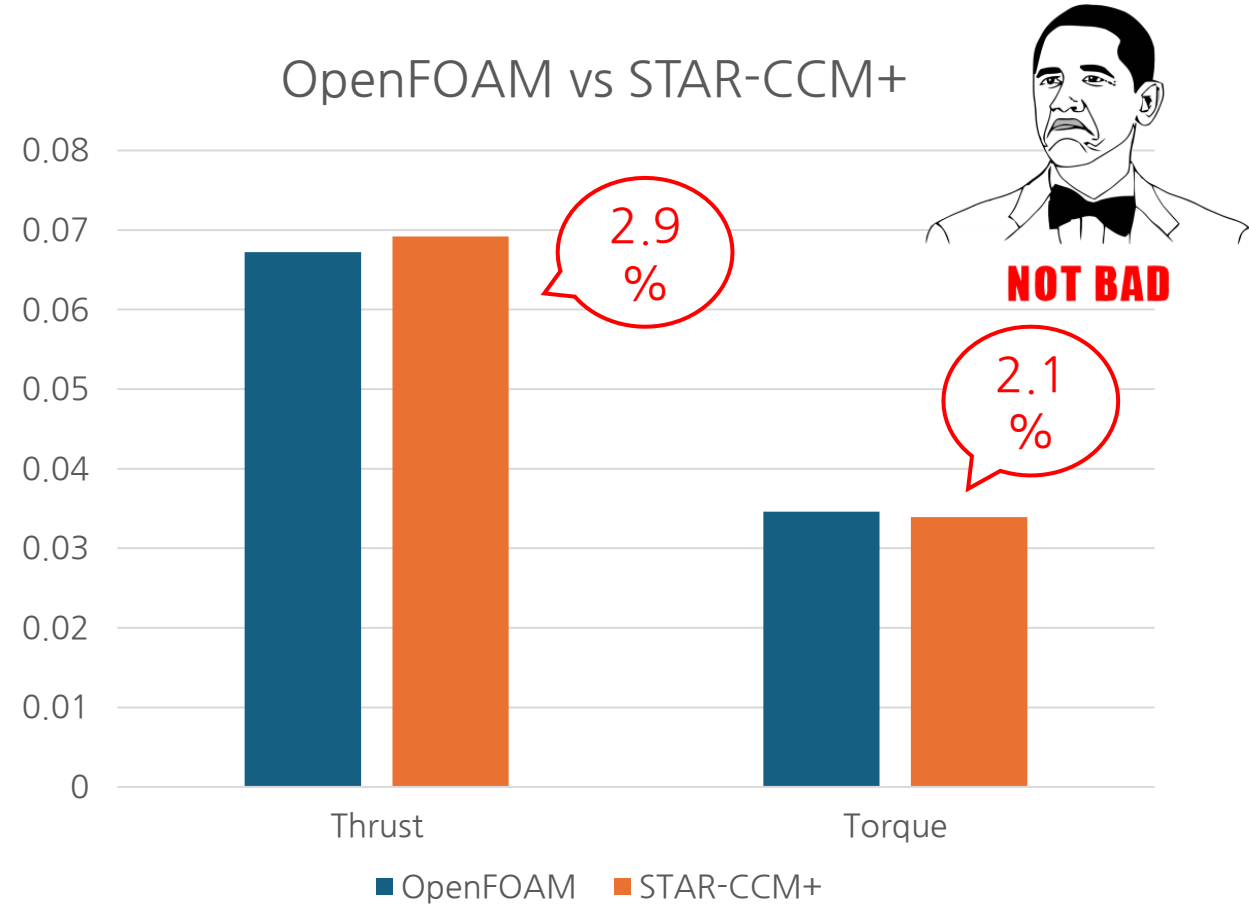
- libAcoustics: <https://github.com/unicfdlab/libAcoustics>

문제 인식

프로펠러: Meizlik 60x21
RPM: 2000rpm

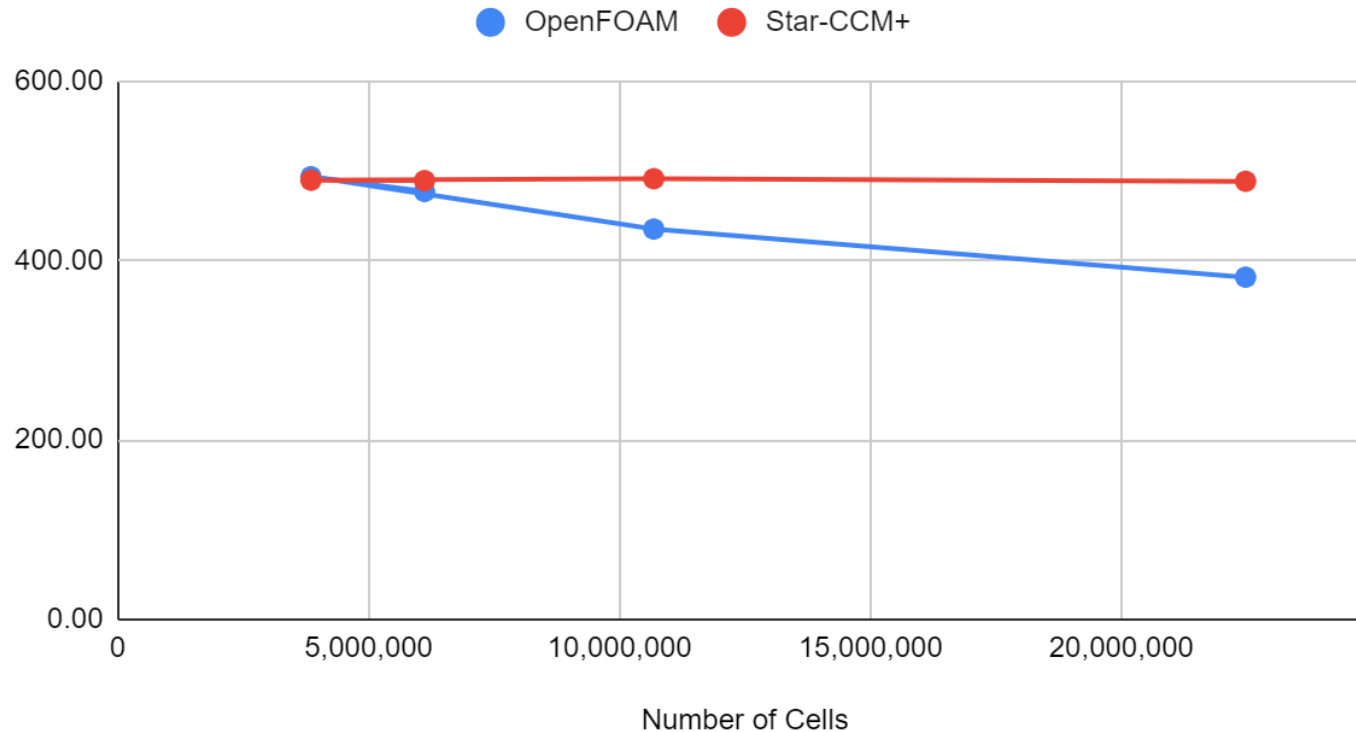


OpenFOAM vs STAR-CCM+



문제 인식

Grid Consistency Test



- STAR-CCM+는 일정한 grid consistency 결과를 보임
- Fine mesh에서 Coarse 대비 thrust 기준 약 20%까지 차이가 나는 문제 확인

이제까지 계산한 모든 case에 문제가 있을 수 있다

문제의 원인

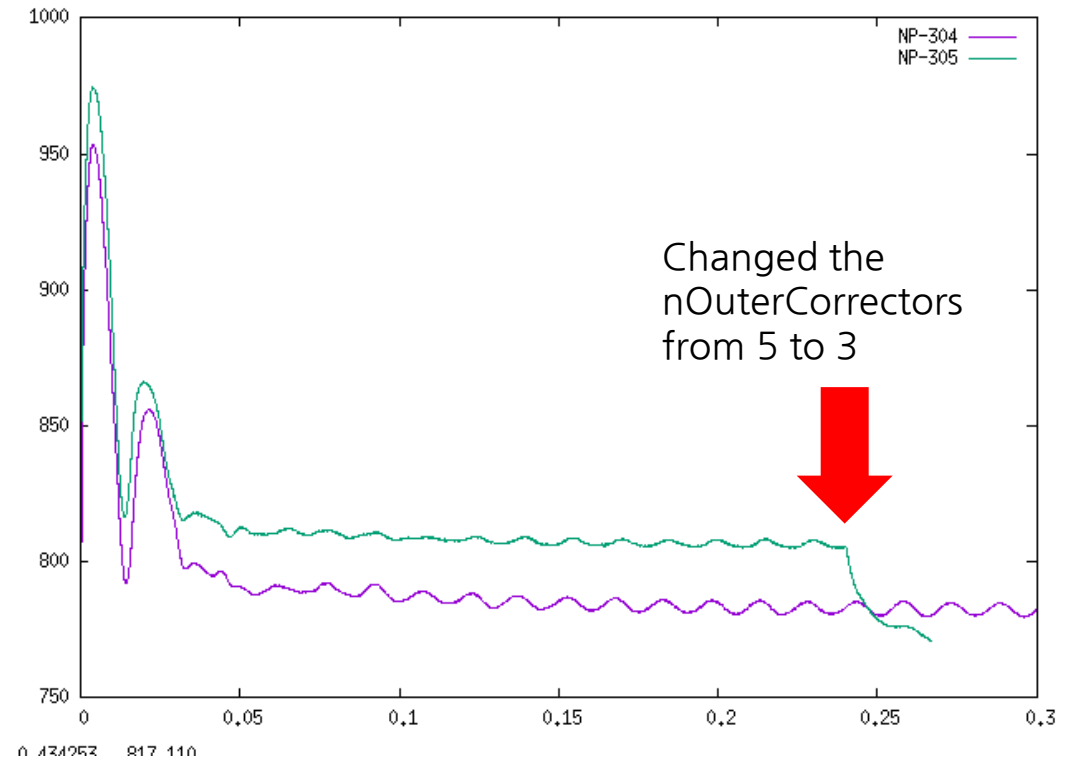
- OpenFOAM-v2306 with pimpleFoam.n3
- Rotating geometry
- cyclicAMI

Issues

- No consistency in grid test
- This might be due to
 - ~~pimpleFoam algorithm (relaxing pressure etc.)~~
 - ~~Rotating algorithm~~
 - ~~Wall functions~~
 - ~~Velocity field clipping~~

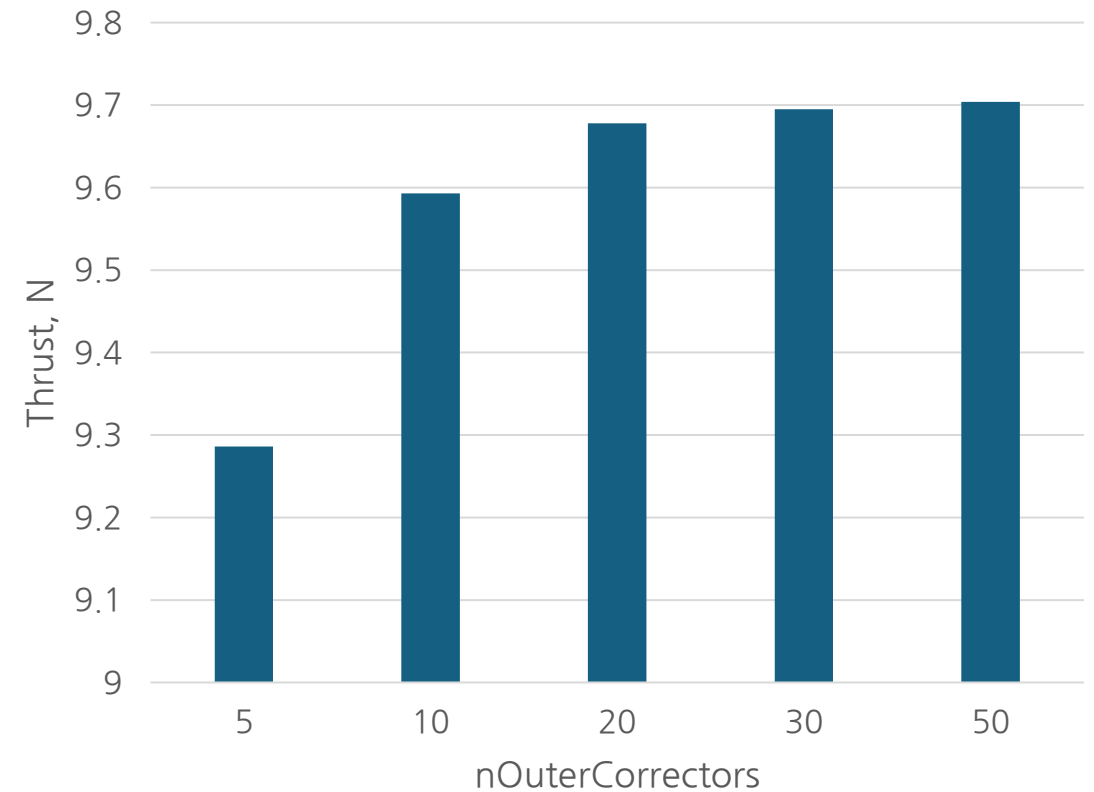
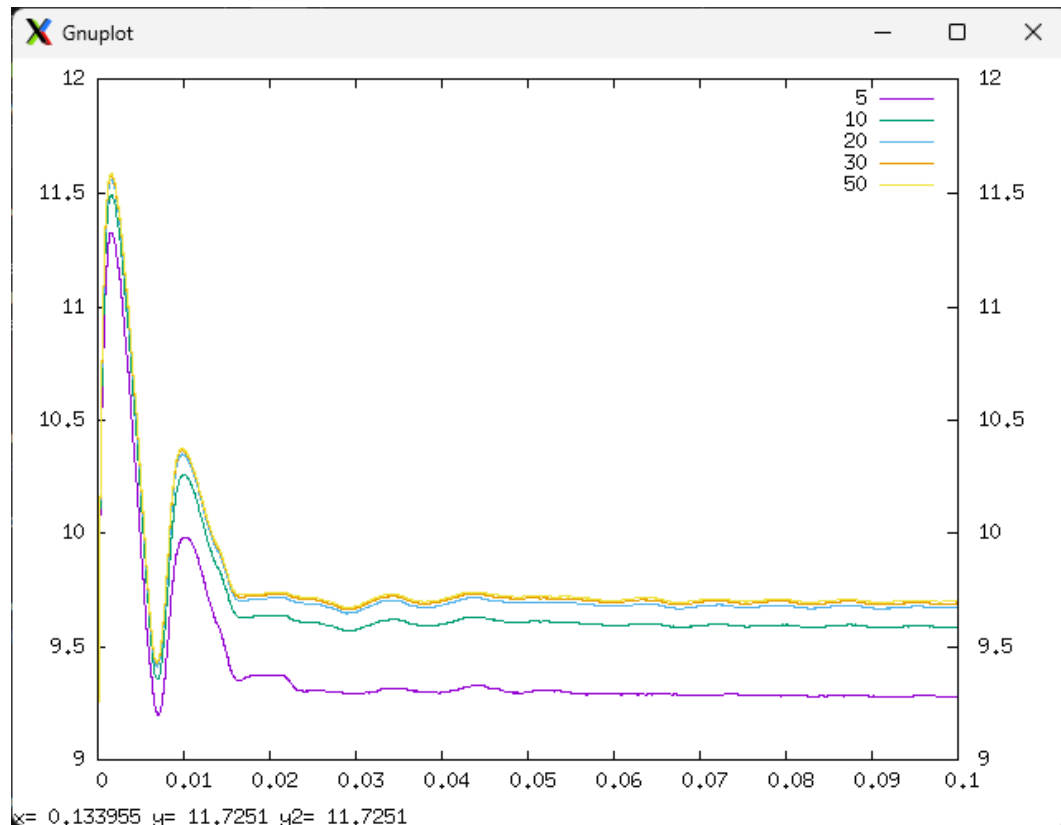
Remarks

- Wall functions have been tested and nut wall function affected the simulated solutions, but the effect was not very severe.
- Rather, the PIMPLE algorithm seems to largely affect the simulation results



해결 방법

- 가정: PIMPLE의 outer iteration 단계에서 충분히 유동장이 수렴되지 않았을 것이다
- 테스트 방법: nOuterCorrectors를 5, 10, 20, 30, 50으로 설정하고 해석을 수행 및 결과 확인
- 해석 케이스: T-motor 12x6 프로펠러



Remark

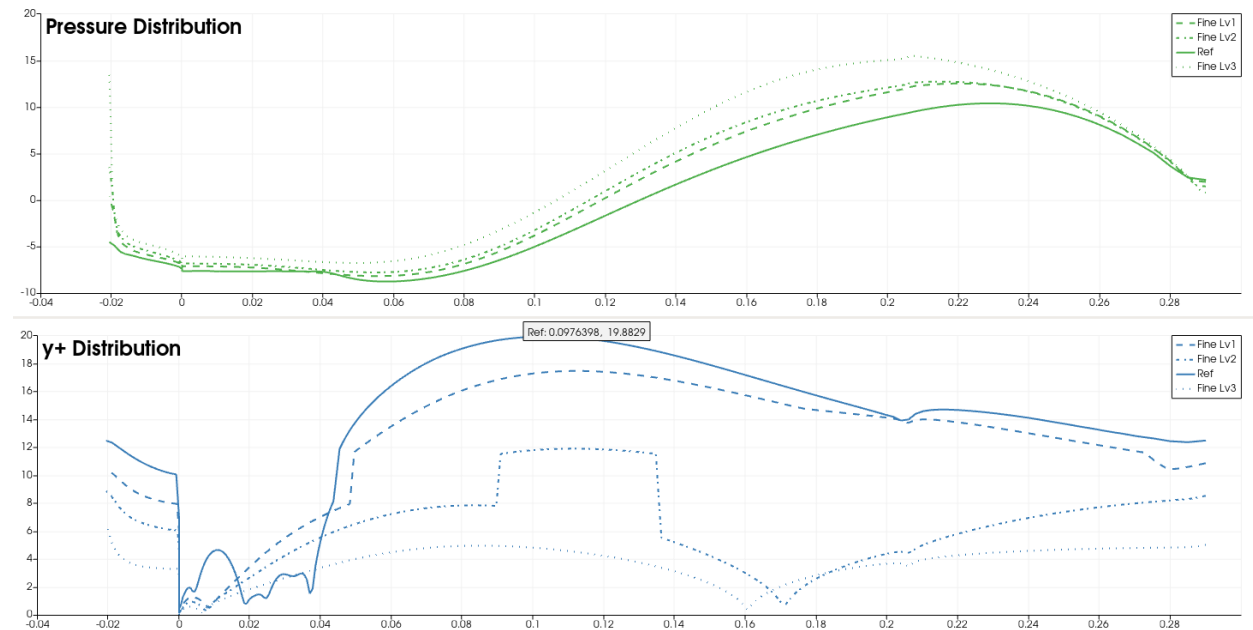
모든 transient 계산에 높은 nOuterCorrectors 숫자가 필요한가?

Motion이 없는 case의 경우 특별히 높은 nOuterCorrectors 숫자가 필요한 것은 아닐 수 있음

- Case: Pitz-Daily backstep flow
- Compared pressure distributions on the lower wall
- There's no consistency on the grid test

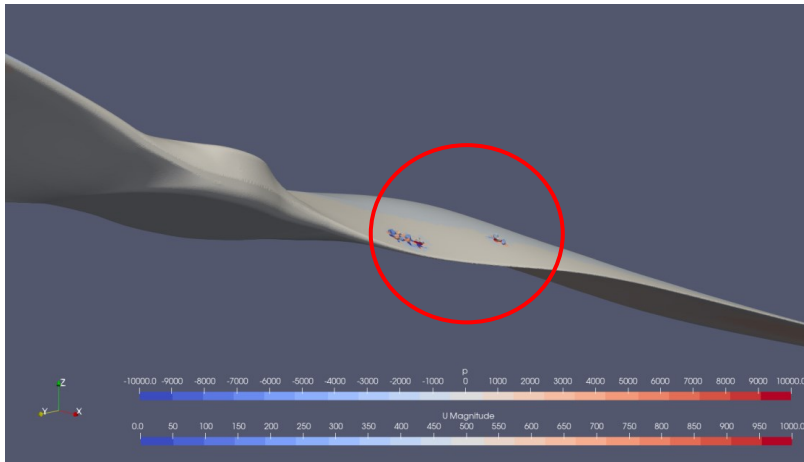
Reasons that can affect the result

- Turbulence model
 - Turbulence model
 - Wall Function
- Convergence level

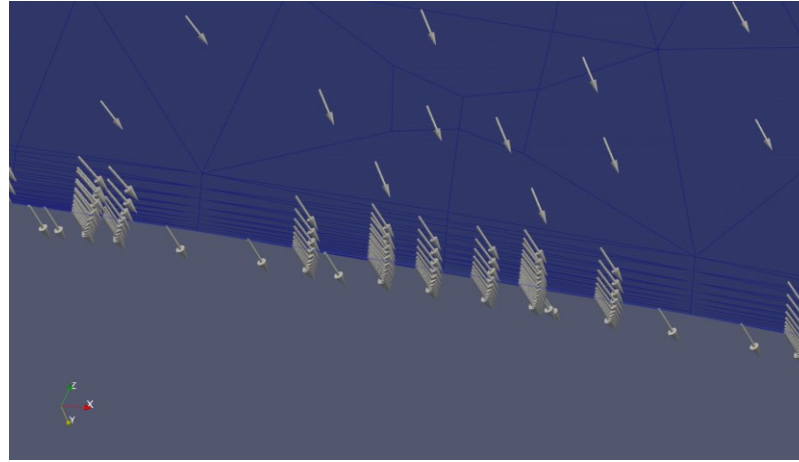


또 문제 발생

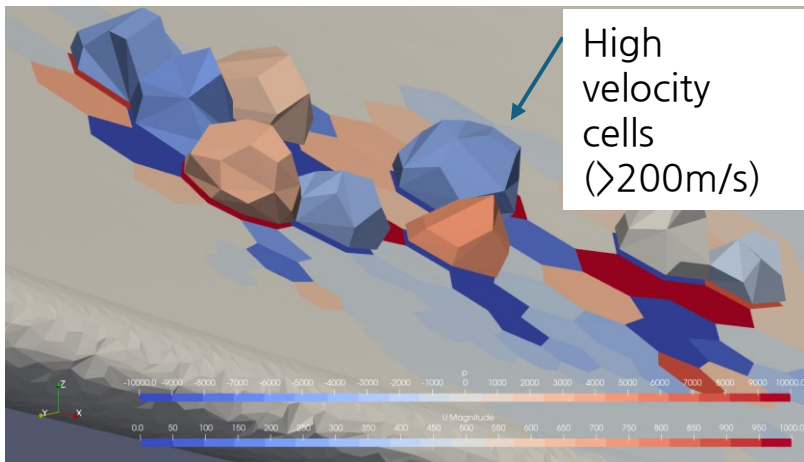
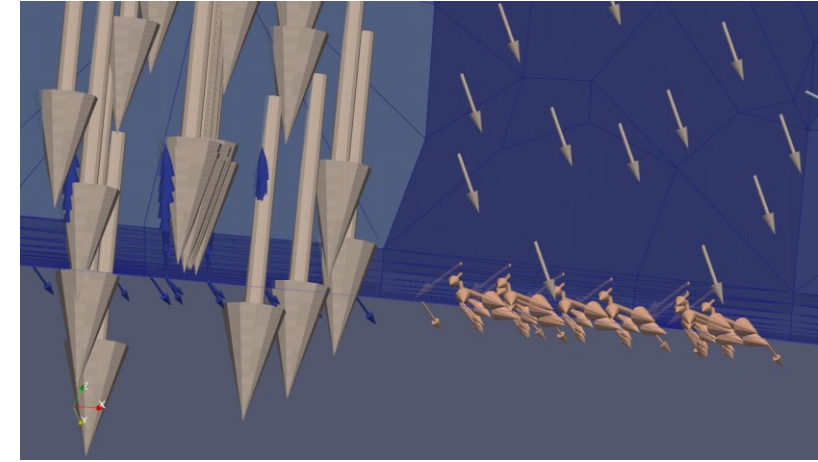
벽면 근처의 유동을 resolv하기 위해 prism layer를 구성하였을 때 prism layer 격자와 주변 격자 사이에 매우 큰 mesh grow size ratio로 pressure의 jump 또는 checkerboard 문제 발생



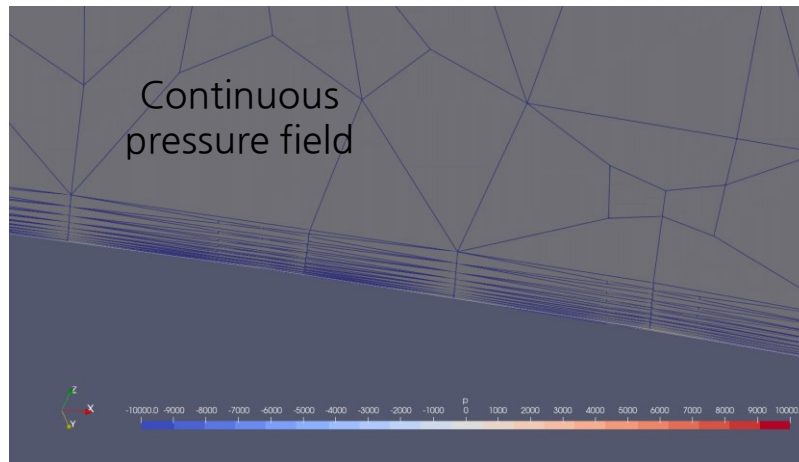
Normal cells



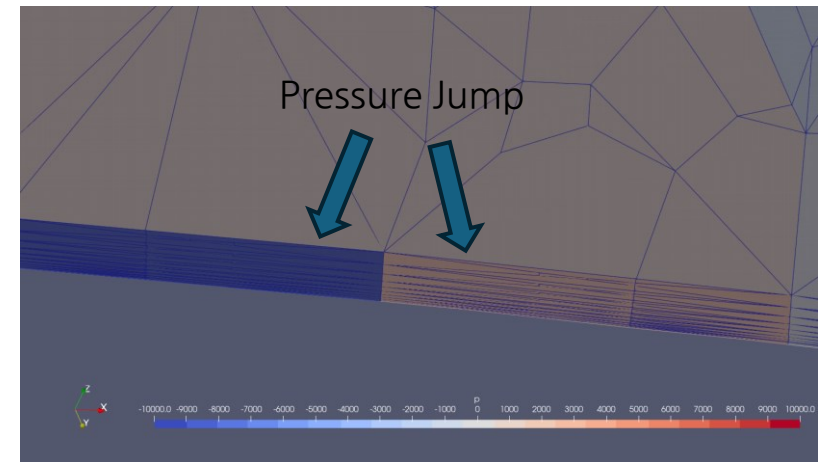
Abnormal cells



Continuous pressure field

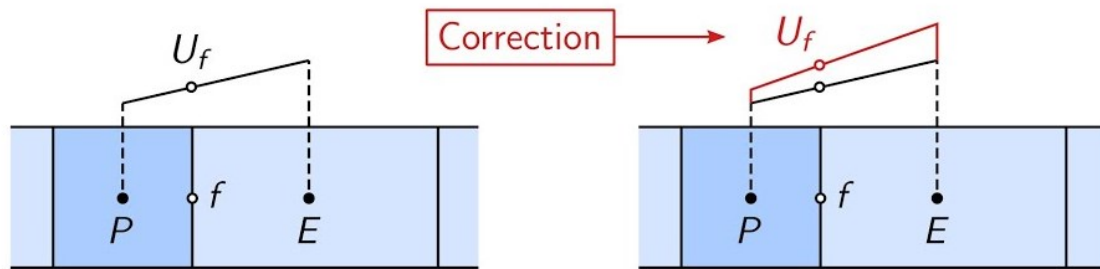


Pressure Jump

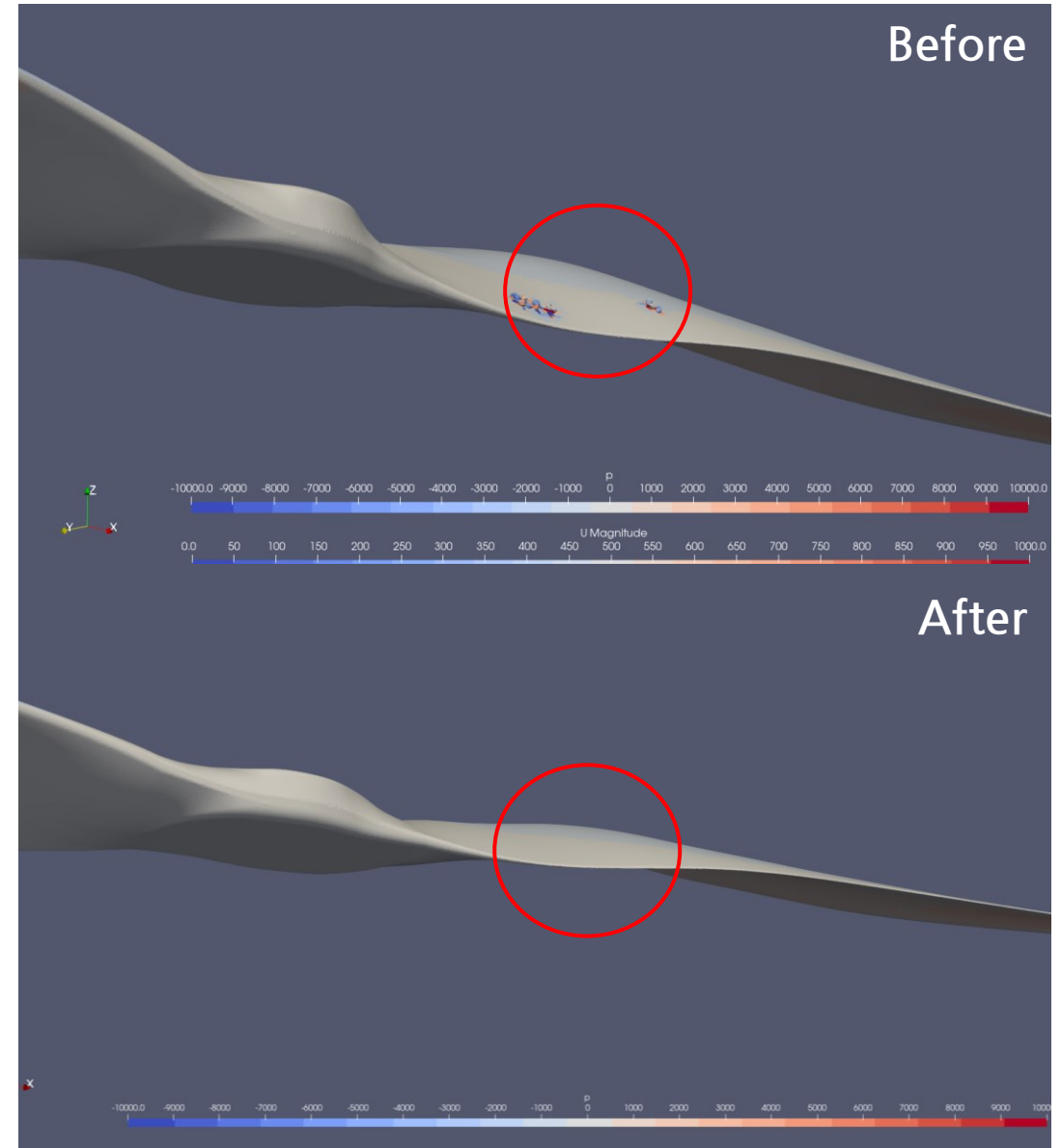


또 문제 해결

Rhie-Chow interpolation!



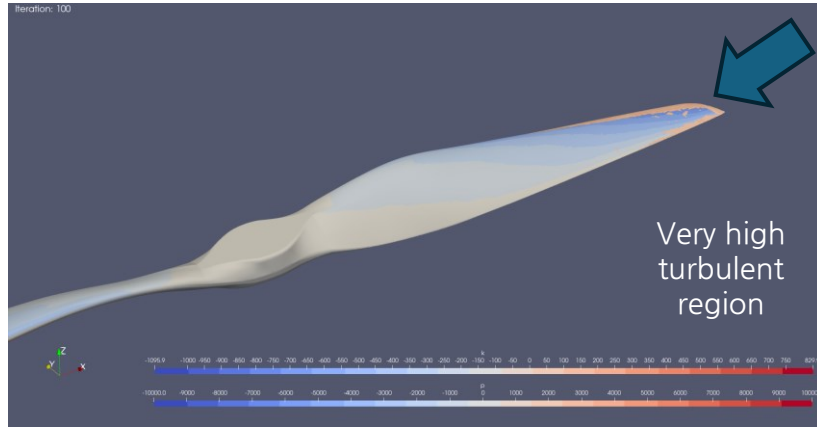
$$U_f = \bar{U}_f - \underbrace{\bar{d}_f \left(\left. \frac{\partial p}{\partial x_j} \right|_f - \overline{\left. \frac{\partial p}{\partial x_j} \right|_f} \right)}$$



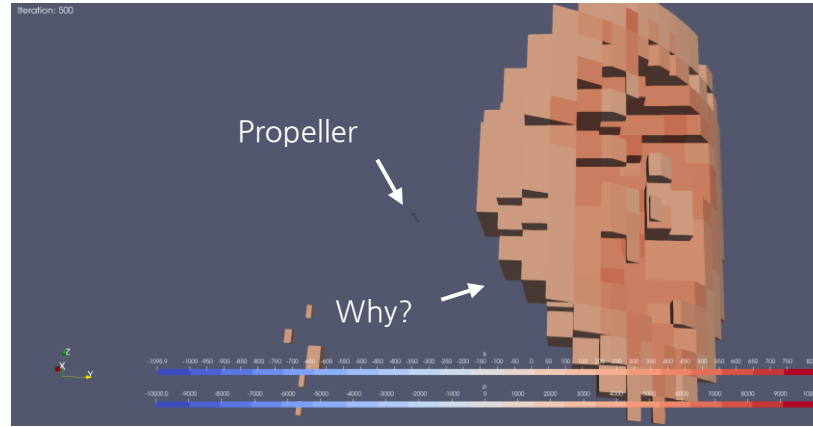
또또 문제 발생 그리고 해결

난류가 자란다?

Run0



Threshold of TKE over 100



Threshold of TKE over 100

$$\frac{Dk}{Dt} = P_k - \epsilon + D$$

$$P_k = \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$$

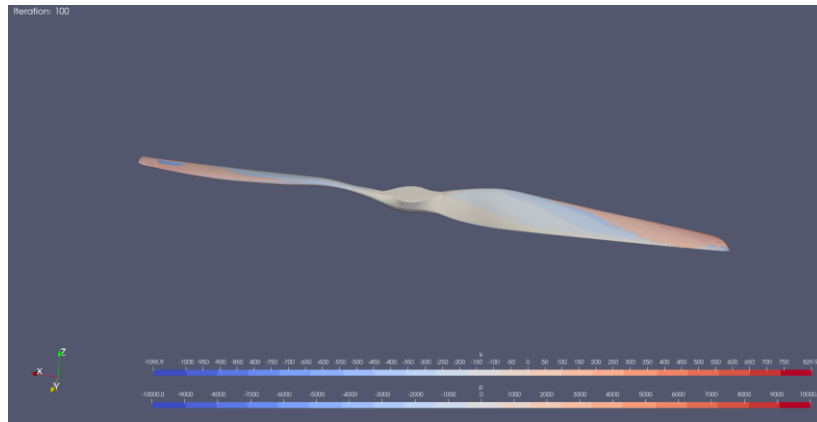
$$P_k = \min(P_k, 10\beta\rho\omega k)$$

$$\nu_t = \min(\nu_t, 10^5 \nu)$$

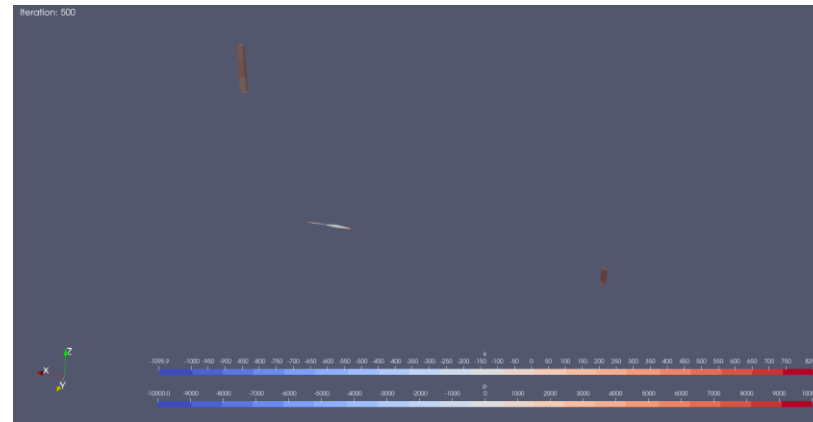
```
gradSchemes
{
    grad(U)
    cellLimited<cubic> 1.5
    Gauss linear 1;
}
```

Run1

With nut & production limiter



With nut limiter (with 1E+5xnu)



With nut limiter (with 1E+5 x nu)

결론

- PIMPLE Algorithm을 사용할 때 유동장이 충분히 수렴할 수 있도록 outer iteration을 설정해줘야 한다 (20 이상)
 - 그러나 무한정 nOuterCorrectors 숫자를 늘리는 것은 계산 시간이 매우 크게 늘어날 수 있다
 - residualControl을 활용하자
 - 모든 케이스에 nOuterCorrectors 20이 유효한 것은 아니다
- Rhie-Chow interpolation을 활용하여 pressure의 checkerboard 문제를 해결할 수 있다
 - 그러나 격자를 우선적으로 잘 짜고, 그 다음 수치적으로 해결할 생각을 하자
- Turbulent field 계산에 있어서 적절한 limiter를 적용함으로써 계산 안정성을 개선할 수 있다
 - Shear rate tensor에 대한 realizable limiter
 - Production term에 대한 limiter
 - Turbulent viscosity에 대한 limiter

```
PIMPLE
{
    nOuterCorrectors 20;
    nCorrectors 2;
    transimple yes;

    residualControl
    {
        p
        {
            tolerance 1e-4;
            relTol 0;
        }
    }
}
```