

오픈 소스 CFD 코드를 이용한 터빈 노즐의 압축성 유동 해석

강승환*[†] · 정희윤* · 강영석* · 전상욱* · 윤태호**

Compressible flow analysis of turbine-nozzle using open source CFD code

Seung-Hwan Kang*, Heeyoon Chung*, Young Seok Kang*, Sangook Jun*, Tae Ho Yoon**

Key Words : CFD(전산유체역학), Gas turbine engine(가스터빈엔진), OpenFOAM(오픈폼), Supercomputer(슈퍼컴퓨터), Turbine nozzle(터빈 노즐)

ABSTRACT

This study has been conducted to utilize the open source code in analyzing the performance of a gas turbine engine. The turbine nozzle vanes, which are relatively simple to analyze among the gas turbine engine components, were selected for analysis, and the analysis was carried out by OpenFOAM which is the most well-known tool as an open source CFD code. Among the solvers provided by OpenFOAM, rhoSimpleFoam and rhoPimpleFoam were used to analyze the compressible flow, and the JANAF option enabled to apply the function of temperature to the thermal properties. rhoSimpleFoam was able to calculate quickly and correctly in the region below the $Ma = 1$, but not affordable for the transonic region with shock wave, which was compensated with rhoPimpleFoam with the transonic option resulting in converged solution. The calculated results by OpenFOAM were compared to those by ANSYS - CFX and showed good agreement.

Nomenclature

As	: Sutherland coefficient
CFD	: 전산유체역학 (Computational Fluid Dynamics)
CFL	: Courant-Friedrichs-Lewy number
Cp	: Specific heat at constant pressure
H	: 엔탈피 함수
LTS	: Local Time Stepping
Pr	: Prandtl number
PTS	: Physical Time Stepping
rhSp	: rhoSimpleFoam
rhPp	: rhoPimpleFoam
S	: 엔트로피 함수
Ts	: Sutherland temperature
κ	: 열전도계수
$\mu(\mu)$: 점도

1. 서론

가스터빈 엔진을 설계하고 제작하기에 앞서 설계된 엔진 구성품들의 성능 예측이 필요하며, CFD 해석을 통해 각 구성품들의 성능 예측이나 문제점을 확인할 수 있다. 현재 여러 상용 유동 해석 툴이 존재하며, CFD 오픈 소스 코드 중 예선 오픈폼(OpenFOAM)이 가장 잘 알려져 있다. 오픈 소스 코드의 장점은 사용자가 코드를 직접 확인할 수 있고, 사용자의 필요에 따라 코드를 수정해서 쓸 수 있다는 데에 있다. 단, 진입장벽이 높고 그 과정이 번거로워서 오픈 소스 코드를 유용하게 다루는 데엔 어려움이 따른다.

본 연구는 가스터빈 엔진 구성품의 성능을 해석하기 위해 오픈폼을 활용하는 방법을 확인하고자 수행되었다. 해석 대상으로 가스터빈 엔진 구성품들 중에서 비교적 형상이 간단하고 순압력 구배를 이루는 터빈 1 단의 노즐 (nozzle)을 선정하였다.

* 한국항공우주연구원 항공추진연구부 (Aeropropulsion Research Division, Korea Aerospace Research Institute)

** 한국과학기술정보연구원 (Korea Institute of Science and Technology Information)

[†] 교신저자, E-mail : hahacar@kari.re.kr

국내에 오픈폼이 도입되어 사용된 것은 약 10년 정도 된 것으로 보이며^(1,2), 그 이후로 여러 연구들이 진행되고 있다. 하지만 대다수의 경우 선박⁽³⁾, 비압축성 공력해석⁽⁴⁾, 연소⁽⁵⁾ 등에 관한 내용들이 주를 이루고 있으며 압축성유동 터보유체기계에 대한 연구는 거의 이뤄지지 않고 있다⁽⁶⁾.

따라서 본 논문에선 가스터빈 엔진과 같이 고온·고압에서 운전되는 압축성 유동 해석을 위한 오픈폼 적용 방법을 소개하고, 기존의 상용 툴인 ANSYS - CFX 결과와 비교하여 해석 가용성을 확인하고자 한다.

2. 오픈폼 해석을 위한 기반 구성

2.1 오픈폼(OpenFOAM)

오픈폼은 약 세 가지 버전으로 분류할 수 있다. ESI Group에서 공개하는 버전(현재 v2006)과 OpenFOAM Foundation에서 공개하는 버전(현재 v8), 그리고 foam-extend 버전(현재 4.1)이 있다. 앞의 두 버전은 대부분 서로 호환이 가능하지만 foam-extend 버전에선 일부 차이가 있기에 주의가 필요하다. 특히 foam-extend 버전은 앞의 두 버전이 제공하지 않는 터보유체기계 해석에 유용한 기능 - unequal pitch interface 기능 및 압축성 rotating frame 기능, 등 - 을 제공하기 때문에 foam-extend 버전을 써야 본격적인 터보기계 해석이 가능한 것으로 간주된다.

하지만 본 연구에서 해석 대상으로 선정한 터빈 노즐은 정지 도메인이기 때문에 일반 버전에서도 충분히 해석이 가능하고, 일반 버전이 접근하기에 비교적 수월하기 때문에 본 연구에선 OpenFOAM Foundation의 v7 버전을 사용하여 해석을 진행하였다.

Windows 환경에서 구동되는 일반 PC에서 WSL2 및 Ubuntu 18.04 LTS를 설치 후 오픈폼을 설치하여 전처리 및 기본 계산을 수행했고, 실제 계산은 한국과학기술정보연구원(이하 KISTI)의 슈퍼컴퓨터를 통해 진행되었다.

2.2 KISTI 슈퍼컴퓨터

본 연구는 “슈퍼컴퓨터 5호기 활용 초고성능컴퓨터 기반 R&D 혁신지원 프로그램” 및 “최적병렬화 지원사업”에 의하여 KISTI 슈퍼컴퓨터 누리온을 활용하여 계산이 진행되었다. 누리온은 Knight Landing (이하 KNL)과 Skylake (이하 SKL) 서버로 이루어져 있다. KNL의 CPU는 Intel Xeon Phi 7250 1.4GHz로 약 56만 개의 코어로 이루어져 있고, SKL의 CPU는 Intel Xeon 6148 2.4GHz로 약 5천 개의 코어로 이루어져 있다⁽⁷⁾.

본 연구의 유동 해석은 KNL 서버에서 병렬로 이루어졌으나, 병렬화 계산을 위한 해석 도메인의 분할 시간을 시험해

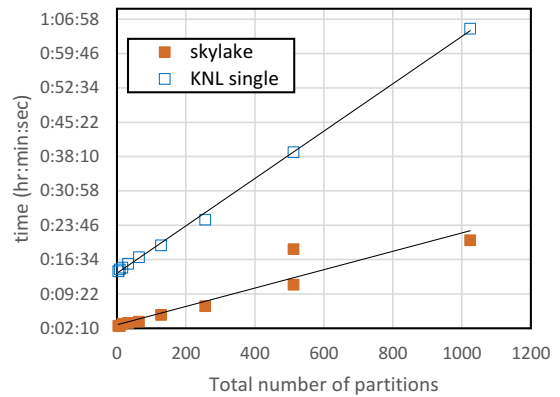


Fig. 1 Decomposing time for multi processors

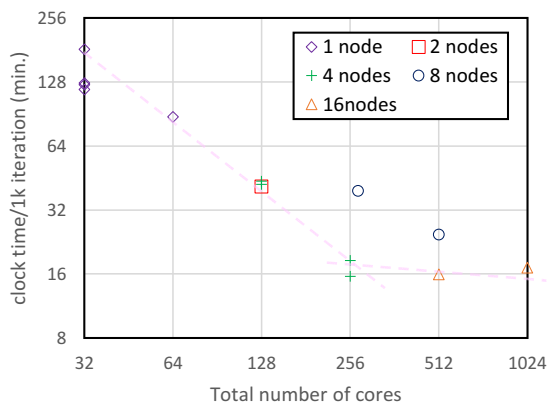


Fig. 2 Calculating time by multi processors

본 결과, Fig. 1과 같이 SKL 서버가 KNL 서버보다 최소 3배 이상 빠른 것으로 나타남에 따라 decomposePar 명령어를 통한 해석 도메인의 병렬화는 SKL 서버를 활용하였다. 한편, KNL 서버에서 실제 이루어지는 병렬 계산의 코어 개수 별 해석 시간은 Fig. 2에 나타내었다. 해석 대상, 해석 방법 등 여러 변수에 따라 계산 시간의 차이가 발생할 것으로 예상되며, 본 연구의 예에선 약 천만 개의 요소를 갖는 격자의 정상상태 해석을 기준으로 계산할 때의 해석 시간을 비교해 봤을 때 256 개의 코어 수 이상에선 해석 시간의 이점이 없는 것으로 나타났다.

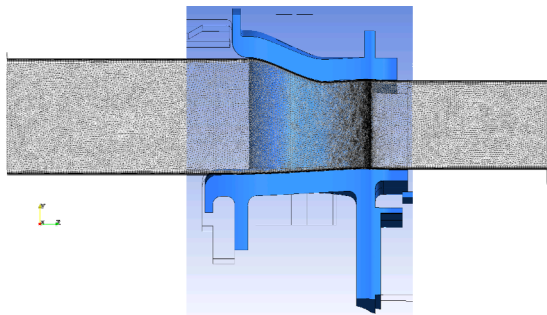
2.3 해석 모델

2.3.1 터빈 노즐의 제원 및 격자

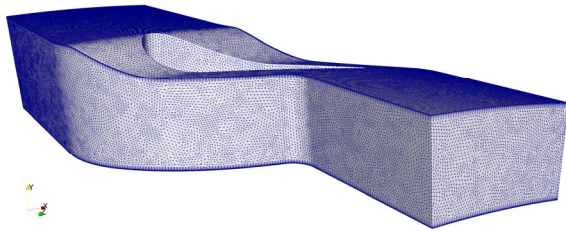
한국항공우주연구원에서 연구 중인 냉각 터빈 모델 중에서 비교대상으로 만들어진 터빈 1단의 무냉각(Uncooled) 노즐을 본 연구의 해석 대상으로 선정하였다. 이 노즐은 가스터빈 엔진의 연소기에서 나오는 고온·고압의 가스를 바로 맞는 고압터빈 첫째 단의 노즐로서, 총 56 개의 베인(Vane)을 지니고 있고, 노즐의 제원과 설계점은 Table 1에, 그 형상과 격자의 모습은 Fig. 3에 나타내었고, 자세한 설계 내용

Table 1 Design specifications of nozzle

Streamwise length of domain	100 mm
R _{hub}	266.50 mm
R _{shroud_inlet}	288.29 mm
R _{shroud_outlet}	283.16 mm
Inlet total pressure	30.685 bar
Inlet total temperature	1400 °C
Outlet static pressure	15.65 bar



(a) Side view



(b) Isometric view

Fig. 3 The geometry of the uncooled nozzle and the mesh of the fluid domain

및 해석 방법 등은 선행연구^(8,9)에 소개되어 있다.

격자 생성은 ANSYS meshing을 통해 이루어졌으며, 격자의 총 노드 수는 3,817,622, 총 요소 수는 11,732,181개를 가지며, 최대 y+는 12 이하의 값을 갖도록 계산되었다.

2.3.2 CFX 설정

오픈폼 해석 결과와 비교해보기 위해 ANSYS - CFX 19.0을 활용한 해석도 함께 수행되었다. 입구에 전압력, 출구에 정압력 조건을 설정했으며 각 면에서 분포값이나 평균값이 아닌 균일한 값이 되도록 설정하였다. 도메인의 측면은 Rotational Periodicity 조건을 설정하였다. Fluid Models로는 Total Energy 열전달 옵션 및 Shear Stress Transport 난류 옵션을 설정하였다. 작동유체는 이상기체 공기를 적용하였고, 열역학적 물성치는 다음 장에서 함께 소개한다. 계산 방법에 대해선 Advection Scheme의 경우 High Resolution, Turbulence Numerics에 대해선 First Order를 적용하였다.

3. 오픈폼 해석 전처리

오픈폼의 한 해석 그룹은 총 3개의 폴더로 구성되어 있다. Solver 조건 등을 설정하는 ‘system’ 폴더, 격자 및 물성치와 난류 조건 등을 담당하는 ‘constant’ 폴더, 변수들의 초기 값을 설정하는 ‘0’ 폴더가 있다. 오픈폼에서 사용되는 단위는 질량 kg, 길이 m, 시간 s, 온도 K, 물질의 양 kgmol, 전류 A, 광도 cd로 총 7 가지의 기본단위를 사용하며, 이 외의 파라미터 및 계수 등은 무차원으로 간주하여 사용할 수 있다. 이번 장에선 각 폴더에서 사용하는 파일들과 설정 내용을 소개한다. 오픈폼 내에서 사용되는 용어에 대해선 본문에서 이탤릭으로 나타내었다.

3.1 system

3.1.1 솔버(solver)

본 연구에선 압축성 유동 해석에 활용하는 rhoSimpleFoam과 rhoPimpleFoam을 사용하였다. rhoSimpleFoam은 SIMPLE 알고리즘을 사용하는 정상상태 해석 솔버이고, rhoPimpleFoam은 PISO와 SIMPLE 알고리즘이 융합된 형태로서 비정상상태 해석 솔버로 소개되어 있다⁽¹⁰⁾. 오픈폼을 이용하여 터보유체기계를 해석한 다른 연구에 따르면 sonicFoam을 사용한 것으로 소개되어 있으나⁽¹¹⁾ OpenFOAM Foundation v7 버전에선 sonicFoam을 제공하지 않고 transonic 옵션을 활용하여 rhoPimpleFoam을 사용할 것을 유도한다. 한편, Foundation 버전에선 에너지 방정식에 점성소산항이 누락되어 있어⁽¹²⁾ 경계층 유동을 모사하는 데에 한계가 있을 수 있는 반면, ESI 버전에선 fvOptions 파일을 통해 이 부분이 보완 가능하다⁽¹³⁾. 본 연구에선 전체적인 유동 특성을 파악하는 데 초점을 두었기 때문에 그대로 Foundation 버전을 사용하여 해석을 진행하였다.

rhoSimpleFoam의 경우 *deltaT*를 1로 설정했고, rhoPimpleFoam의 경우엔 *deltaT*를 1e-7로 설정하였으나, *adjustTimeStep* 옵션을 활성화하고 최대 CFL 수를 뜻하는 *maxCo*를 어떻게 설정하는지에 따라 *deltaT*는 변화한다. 본 해석 모델의 경우 *maxCo*를 1로 설정할 때 *deltaT*는 약 7.7e-9 수준에서 계산되었다.

3.1.2 Scheme and solution

fvSchemes 파일의 divShcemes 항은 상류 절점의 값을 격자 면의 값으로 차용하는 upwind를 주로 설정하였고, 자세한 설정 내용은 다음과 같다.

```
divSchemes
{
  default      none;
  div(phi,U)   Gauss upwind;
  div(phi,k)    Gauss upwind;
  div(phi,omega) Gauss upwind;
```

```
div(phi,h) Gauss upwind;
div(phi,K) Gauss upwind;
div(((rho*nuEff)*dev2(T(grad(U))))
Gauss linear;}
```

여기서 rhoPimpleFoam으로 해석하는 경우 다음 항과 설정을 추가하였다.

```
div(phiid,p) Gauss limitedLinear 1;
```

fvSolution 파일의 경우 p 에 대해선 GAMG (Geometric algebraic multi-grid) 솔버를, 나머지 변수에 대해선 PBiCGStab (Preconditioned bi-conjugate gradient stabilized) 솔버를 설정했다. 또한 rhoPimpleFoam의 경우엔 rho.* 항목이 추가되며, diagonal 솔버를 지정했다.

SIMPLE 알고리즘을 다룰 경우 알맞은 완화계수 (relaxationFactor)를 사용하는 것이 해를 얻는 데 중요하다. 본 연구에선 p 에 대하여 0.4, rho에 대하여 0.01, 나머지는 0.7로 설정하였다.

rhoPimpleFoam을 사용하는 경우엔 PIMPLE 항목에 Transonic 옵션을 활성화하였다.

3.2 constant

3.2.1 격자

오픈폼에서도 dictionary 파일 및 blockMesh 유틸리티를 통해 격자 생성이 가능하지만 형상이 복잡해질수록 그 작업은 많은 시간과 노력을 필요로 한다. 따라서 다른 모델링 프로그램 및 격자 생성 프로그램을 이용하여 격자파일을 만든 후 오픈폼 격자로 변환하는 것이 수월하다.

ANSYS 프로그램에서 격자파일을 생성할 경우 binary가 아닌 ASCII 형식의 Fluent 메쉬 파일(*.msh)을 생성한 후 fluent3DMeshToFoam 유틸리티를 통해 오픈폼 격자로 변환할 수 있다. 이때 전처리 프로그램에서 면 설정을 해준 경우엔 오픈폼 격자 변환 후에도 Patch 이름이 그대로 따라 오지만, 그렇지 않은 경우엔 autoPatch 유틸리티를 통해 면을 지정해주는 방법이 있다. Patch 이름이나 Patch type을 수정하고자 할 땐 ‘polyMesh’ 폴더의 boundary 파일에서 수정할 수 있다.

3.2.2 난류

turbulenceProperties 파일에서 난류모델 설정이 가능하다. 오픈폼에선 크게 3가지 모델로 구분되어 있으며, laminar, RAS (Reynolds-averaged simulation) 및 LES (large eddy simulation)를 옵션으로 선택할 수 있다. 본 연구에선 RAS를 선택하였고, 세부 난류 모델로는 $k\Omega SST$ 를 사용하였다.

Table 2 Coefficients for JANAF option

	lowCpCoeffs	highCpCoeffs
a0	3.53881	3.0225407
a1	-6.77619e-04	1.3968838e-03
a2	2.26946e-06	-4.9262577e-07
a3	-1.44141e-09	7.8600091e-11
a4	2.91951e-13	-4.6074978e-15
a5	-990.9637	-923.93753
a6	3.4374391	5.8718221

$k\Omega SST$ 를 사용 시에는 ‘0’ 폴더에서 omega 파일을 동반하여야 한다.

3.2.3 열역학적 상태량

thermophysicalProperties 파일에서 작동유체의 열역학적 상태 및 물성치를 설정할 수 있다. 본 연구에서 사용한 주요 옵션으론 hePsiThermo, pureMixture, perfectGas, sensibleEnthalpy 등이다.

물성치를 온도의 함수로 적용할 때는 오픈폼에서 제공하는 여러 옵션의 조합이 존재한다. 먼저 transport polynomial, thermo hPolynomial을 사용하는 경우 각 물성에 대해 온도에 대한 4차 함수를 사용하며, 각 계수는 오픈폼 Tutorial 파일에서 찾아볼 수 있다. 하지만 오픈폼에서 제공하는 Polynomial 계수 사용 시 1000 K 이상에선 실제 함수 곡선을 크게 벗어나서 본 연구에 사용할 수 없음을 확인하였다.

따라서 본 연구에선 transport sutherland, thermo janaf 옵션을 사용하였다. JANAF 옵션은 JANAF Table의 데이터 베이스⁽¹⁴⁾를 근거로 한 물성치 계산방법으로, Tcommon을 중심으로 낮은 온도 영역과 높은 온도 영역의 Cp 함수를 각각 설정하는 방법이다⁽¹⁵⁾. 마찬가지로 오픈폼 Tutorial 파일 중에서 JANAF 옵션의 계수를 찾아볼 수 있으며, 함수 곡선을 확인해 본 결과 실제 물성치 곡선과 비슷하지만, 기존에 사용하던 함수와는 약간의 차이가 있어 Tcommon을 2000으로 설정하고 Table 2와 같이 계수를 수정하여 계산에 적용하였다. 공기의 몰 질량은 28.9645 kg/kmol, 기체상수 R은 287.058 J/kg · K을 적용하였다.

JANAF 옵션에서 사용하는 수식은 다음과 같다.

$$c_p/R = ((a_4 T + a_3)T + a_2)T + a_1)T + a_0 \quad (1)$$

$$H = (((\frac{a_4}{5} T + \frac{a_3}{4})T + \frac{a_2}{3})T + \frac{a_1}{2})T + a_0)T + a_5 \quad (2)$$

$$S = (((\frac{a_4}{4} T + \frac{a_3}{3})T + \frac{a_2}{2})T + a_1)T + a_0 \ln(T) + a_6 \quad (3)$$

여기서 낮은 온도와 높은 온도의 함수 값이 Tcommon에서 일치하지 않는 경우엔 오류가 발생하기 때문

에 계수를 수정할 경우 일정 오차 범위 안에서 두 값이 일치하도록 $a0$, $a5$, $a6$ 계수를 조정해주어야 한다.

한편 Sutherland 옵션에 사용한 계수로는 $As\ 1.4579e-06$, $Ts\ 110.4$, $Pr\ 0.72$ 를 설정하였고, 점성($Pa \cdot s$)과 열전도계수($W/m \cdot K$) 함수식은 다음과 같다⁽¹⁵⁾.

$$\mu = \frac{A_s \sqrt{T}}{1 + T_s \sqrt{T}} \quad (4)$$

$$\kappa = \frac{c_p \mu}{Pr} \quad (5)$$

3.3 0 (초기 조건 파일)

본 연구에서 사용한 초기 조건 파일은 총 7 개로 α , k , ν , ω , p , T , U 파일이다. 입구 압력과 입구 온도에 대해서 $totalPressure$ 및 $totalTemperature$ 조건을 부여하였고 출구 압력에 대해서 전체 면에 동일한 값이 부여되도록 $fixedValue$ 조건을 설정하였다. 입구 유속에 대해서 $pressureDirectedInletVelocity$ 조건을 부여하여 입구 속도가 축 방향이 되도록 하였고, 출구엔 $inletOutlet$ 조건을 부여하고 $inletValue$ 를 0으로 설정하여 출구에서 유동이 역류하지 못하도록 설정하였다. 입구의 k 값은 0.01, ω 값은 10을 설정하였다. 도메인의 측면엔 $cyclicAMI$ 조건을 부여하여 주기적인 경계면을 설정하였다. 베인, 허브 및 슈라우드엔 $wall$ 조건을 설정하였다.

4. 해석 결과

4.1 해석 결과 비교

오픈폼과 CFX로 해석하여 비교한 결과를 Fig. 4와 5에 성능곡선으로 나타내었다. 오픈폼의 경우 $postProcess$ 유틸리티 중 $flowRatePatch$ 와 $patchAverage$ 기능을 활용하여 유량과 출구의 면적 평균값을 산출할 수 있으며, 입구 전압력 대 출구 정압력의 압력비에 따른 노즐 유로 하나 당 유량을 Fig. 4에, 해석 도메인의 출구 평균 온도를 Fig. 5에 나타내었다.

유량의 경우 낮은 압력비에서 오픈폼과 CFX의 오차가 1% 내외에서 형성되었고, 압력비가 증가할수록 초크 유량에 다다르면서 두 계산 결과의 유량의 오차가 0.1% 이내에서 일치하였다. 온도의 경우 대체적으로 0.5% 이내에서 두 결과가 잘 일치하였다.

rhoSimpleFoam으로 해석한 경우, 출구 압력이 18 bar인 압력비 1.7까지 온전한 수렴해를 얻었으나 그 이후의 압력비에서는 계산이 최종 발산하였다. 입·출구 압력비가 1.8 이상, 즉, 출구 압력을 17 bar 이하로 설정하고 rhoSimpleFoam으로 해석하는 경우, 노즐 베인 끝단에서 온도와 압력이 하한값까지

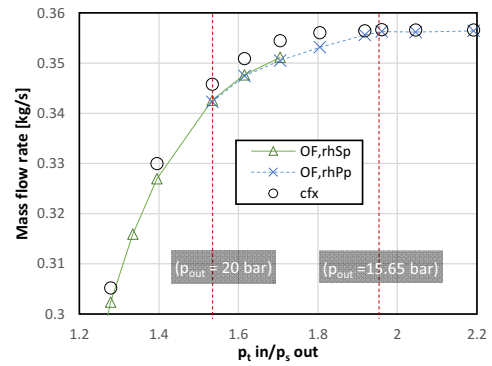


Fig. 4 One passage mass flow rate

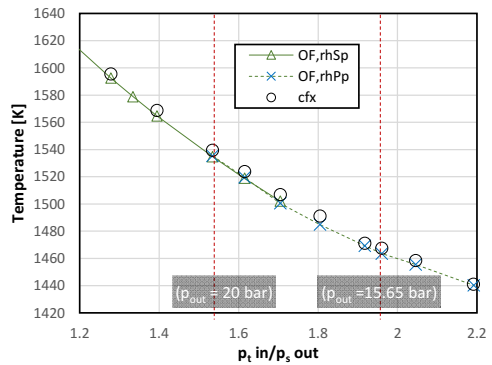
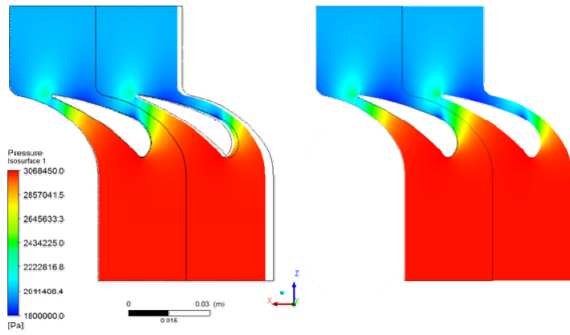


Fig. 5 Outlet average temperature

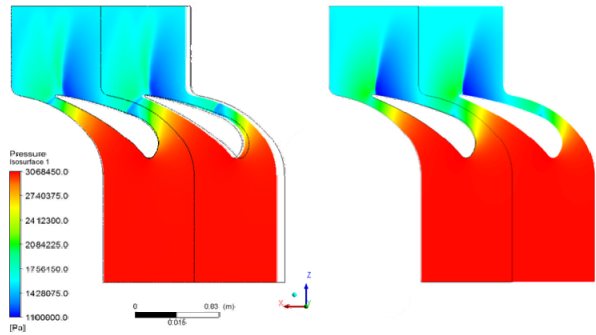
낮아지고 속도와 마하수가 크게 증가하면서 해가 발산하였다. 이 영역은 충격파가 발생하는 지점으로써, 해석 설정 시 안정된 범위의 온도와 압력 한도를 걸어주어도 해를 얻지 못함에 따라 rhoSimpleFoam 솔버는 천음속 구간의 계산을 할 수 없다고 판단하였다.

따라서 천음속 구간에선 Transonic 옵션을 적용한 rhoPimpleFoam으로 계산하는 것이 합리적이며, 출구압력 20 bar에서부터 압력을 낮춰가며 해석하여 그 결과를 Fig. 4와 5의 그래프에 함께 표시하였고, rhoSimpleFoam과 rhoPimpleFoam의 결과가 잘 일치하는 것을 확인할 수 있었다. 단, rhoPimpleFoam으로 계산할 때 일정 수렴해를 얻기 까지 상당한 시간이 소모되므로 이 부분에 있어서 주의가 필요하다.

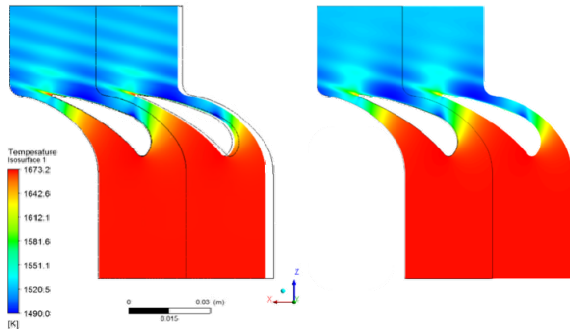
출구압력 20 bar일 때 Mid-span에서의 압력과 온도, 마하수 분포를 Fig. 6에 나타내었고, 출구압력 15.65 bar일 때 Mid-span에서의 압력과 온도, 마하수 분포를 Fig. 7에 나타내었다. 특히, Fig. 7에서 노즐 베인 끝단에서 충격파가 표현됨에 따라서 rhoPimpleFoam이 천음속 구간을 잘 해석하는 것을 확인할 수 있다. CFX의 결과와 오픈폼의 rhoSimpleFoam 및 rhoPimpleFoam으로 계산한 결과가 대체로 유사하게 나타나는 가운데 노즐 출구 영역의 유동의 형태가 주름지게 표현되는 부분에서 약간의 차이가 발생한다. 이는 오픈폼에서 upwind scheme을 사용함에 따라 세세한 부분이 표현되지 못했기 때문이며, 향후 연구를 통해 이 부분이 보완될 예정이다.



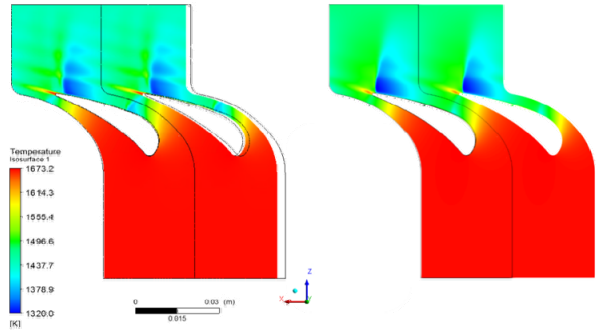
(a) Pressure: CFX(Left), rhoSimpleFoam(Right)



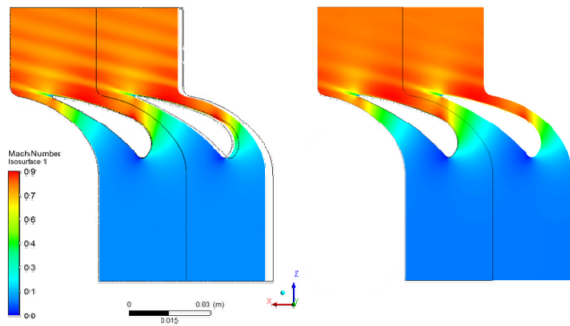
(a) Pressure: CFX(Left), rhoPimpleFoam(Right)



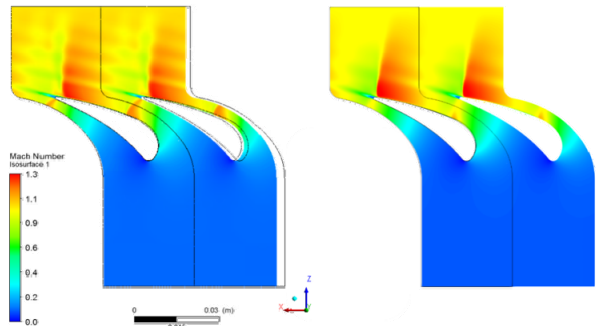
(b) Temperature: CFX(Left), rhoSimpleFoam(Right)



(b) Temperature: CFX(Left), rhoPimpleFoam(Right)



(c) Mach number: CFX(Left), rhoSimpleFoam(Right)



(c) Mach number: CFX(Left), rhoPimpleFoam(Right)

Fig. 6 Comparison of results of p_{out} 20 bar (pressure ratio 1.53) at mid-span

Fig. 7 Comparison of results of p_{out} 15.65 bar (pressure ratio 1.96) at mid-span

Fig. 8에는 Mid-span에서 노즐 베인 표면의 압력비 분포를 나타내었다. 출구압력 20 bar인 경우 CFX와 오픈폼의 결과가 거의 일치하였고, 출구압력 15.65 bar인 경우는 약간의 차이가 있지만 대체로 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다.

4.2 Local Time Stepping

오픈폼의 rhoPimpleFoam으로 계산하는 경우, $maxCo$ 를 지정하고 Physical time stepping(이하 PTS)을 적용하면 가장 작은 격자 크기에 맞춰 시간 간격이 산출되어 반복계산이 수행되기 때문에 상당한 시간이 소모된다. $maxCo$ 를 증가시

키면 Time step을 증가시켜 전체 계산 시간을 줄일 수 있지만 해석이 불안정해지며, 본 연구에선 $maxCo$ 1을 사용했을 때 안정적인 수렴해를 얻을 수 있었다. 따라서 정상상태 케이스를 계산하는 경우 Local time stepping(이하 LTS)을 활용하여 계산 시간을 단축시킬 수 있다.

오픈폼에서 LTS을 쓰고자 하는 경우 fvSchemes 파일의 ddtSchemes항에 localEuler를 설정해주어야 하고, fvSolution 파일의 PIMPLE 항에 추가적인 항목들을 설정해 주어야 한다. 본 연구에선 $maxCo$ 1, $rDeltaT$ SmoothingCoeff 0.1, $rDeltaTDampingCoeff$ 1 및 $maxDeltaT$ 1을 설정하였다. 격자의 요소 수 약 200만 개를 갖는 성긴 격자에서 테스트해 본

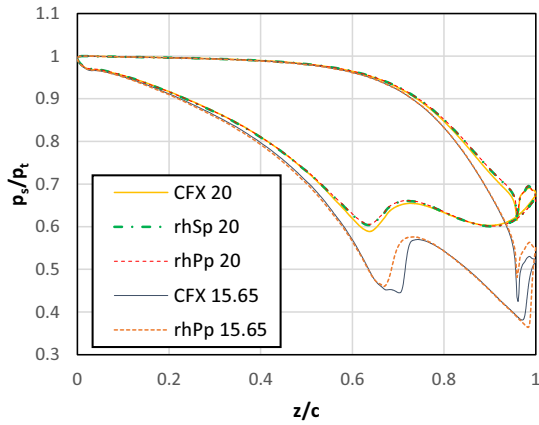


Fig. 8 Comparison of pressure ratio distributions on nozzle vane surface at mid-span

Table 3 Comparison between PTS and LTS

	PTS	LTS
Total number of cores	680	256
Time step (sec)	3e-8	1
Ending time (sec)	0.005	10,000
Duration (hour)	24	3

결과, Table 3에서 나타낸 것과 같이 LTS의 경우 코어 수를 더 적게 썼음에도 불구하고 PTS보다 훨씬 더 빠른 시간 안에 수렴하는 것을 확인하였다.

5. 결 론

본 연구에서는 가스터빈엔진 구성품의 성능 해석을 위해 오픈폼을 적용한 유동해석을 수행하였다. 터빈 노즐에 대해 여러 조건으로 해석을 진행했으며, CFX 계산 결과와 비교 시에도 잘 일치함을 확인하였다. 본 연구를 통한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) KISTI 슈퍼컴퓨터로 병렬 계산이 가능하였고, 약 천만 개의 요소를 갖는 격자로 해석 시 일정 코어 수 (256 개) 이상에선 병렬 해석 시간의 이득이 없는 것으로 확인되었다.
- 2) 오픈폼의 압축성 솔버인 rhoSimpleFoam은 음속 이하의 해석에선 수렴해를 산출하지만 그 이상에선 발산함에 따라 Transonic 옵션을 활용한 rhoPimpleFoam으로 해석하여 음속 이상의 유동도 수렴 해를 얻을 수 있다.
- 3) JANAF 옵션과 Sutherland 옵션을 통해 온도의 함수 물성치를 적용한 해석이 가능함을 확인하였다.

앞으로 다른 가스터빈엔진 구성품들에 대해서도 회전 도메인, 접촉면 등의 기능을 활용한 오픈폼 해석 연구가 진행될 예정이다.

후 기

본 연구는 한국항공우주연구원에서 지원하는 ‘자체연구사업’ 및 ‘중소기업 상용화 개발과제’와 한국과학기술정보연구원에서 지원하는 ‘2020년도 슈퍼컴퓨터 5호기 초고성능컴퓨팅 기반 R&D 혁신지원 프로그램 1차’ 및 ‘최적병렬화 지원사업’의 일환으로 수행되었습니다.

References

- (1) Park, J. K. and Kang, K. H., 2010, “Review on OpenFOAM – Open source software,” Journal of Computational Fluids Engineering, Vol. 15, No. 3, pp. 46~53.
- (2) Park, K., Park, S. W., Rhee, S. H., Lee, S. B., Choi, J., Kang, S. H., 2011, “Program development for the Prediction of the Ship Resistance using OpenFOAM Libraries,” Proceeding of Korean Society for Computational Fluids Engineering 2011 Fall Conference, pp. 326~332.
- (3) Shi, X., Zhang, Y., Yun, D., 2019, “Prediction of Resistance and Planing Attitude for Prismatic Planing Hull using OpenFOAM,” Journal of Ocean Engineering and Technology, Vol. 33, No. 4, pp. 313~321.
- (4) Lee, S., Oh, S., Choi, S., Lee, Y., Park, D., 2018, “Numerical Analysis on Aerodynamic Performances and Characteristics of Quad Tilt Rotor during Forward Flight,” Journal of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences, Vol. 46, No. 3, pp. 197~209.
- (5) Lim, D., Lee, J., Kang, S. H., Seo, S., 2016, “Numerical Investigation of a Gasdynamic Igniter with the OpenFOAM,” Proceedings of the 2016 KSPE Fall Conference, pp. 12~16.
- (6) Kim, T. W., Gill, J. H., 2017, “Development of improved pressure-based solver algorithm for compressible flow,” Journal of Computational Fluids Engineering, Vol. 22, No. 4, pp. 28~35.
- (7) <http://www.ksc.re.kr>
- (8) Kang, Y. S., Rhee, D. H. and Cha, B. J., 2013, “Numerical Study of Contoured Wall Effects on Axial Turbine Internal Flow Field,” Proceeding of 2013 KSME Fluid Engineering Division Conference, pp. 21~22.
- (9) Kim, J. U., Bak, J. G., Kang, Y. S., and Cho, J. S., 2015, “Conjugate heat transfer analysis for high pressure cooled turbine vane in aircraft gas turbine”, The KSFM Journal of Fluid Machinery, Vol. 18, No. 2, pp. 60~66.
- (10) Penttinen, O., 2011, “A pimpleFoam tutorial for channel flow, with respect to different LES models,” http://www.tfd.chalmers.se/~hani/kurser/OS_CFD_2011/OlofPenttinen/projectReport.pdf

- (11) Heinrich, M., and Schwarze, R., 2013, "Simulation of the Compressor Stage of a Turbocharger: Validation of the Open Source Library OpenFOAM," Proceedings of the ASME Turbo Expo 2013: Turbine Technical Conference and Exposition, Volume 6B: Turbomachinery, San Antonio, Texas, USA, GT-2002-30327, V06BT37A010.
- (12) <https://cfd.direct/openfoam/energy-equation/#x1-70004>
- (13) <https://www.openfoam.com/documentation/guides/latest/doc/guide-fvoptions-sources-viscous-dissipation.html>
- (14) Chase, M. W., Curnutt, J. L., Hu, A. T., Prophet, H., Syverud, A. N. and Walker, C., 1974, "JANAF Thermochemical Tables, 1974 Supplement," Journal of Physical and Chemical Reference Data, Vol. 3, No. 2, pp. 311~480.
- (15) OpenFOAM User Guide version 7