

고압터빈 노즐 베인의 열유동 해석에 대한 OpenFOAM 가용성 연구

김석민* · 이동호** · 강영석**†

A Study on the Feasibility of OpenFOAM for the Thermal Fluid Analysis of High-Pressure Cooled Turbine Vane

Seokmin Kim*, Dong-Ho Rhee**, Young Seok Kang**†

Key Words : Gas turbine(가스터빈), High pressure turbine(고압 터빈), Film cooling(막냉각), CFD(전산유체역학), OpenFOAM(오픈폼)

ABSTRACT

In this study, a numerical analysis was performed on the first-stage nozzle of a high-pressure turbine. OpenFOAM, a well-known open-source CFD code was used in this study and its feasibility for analyzing high-pressure cooled turbines was evaluated in comparison to Ansys CFX. The geometry considered in this work is the first-stage nozzle of a high-pressure turbine in a turboshaft engine, which includes internal cooling passages and film-cooling holes. Both solvers used numerical schemes with same order of accuracy, and the $k-\omega$ SST model for the turbulence model. The computational mesh was generated so that the y^+ value of the nozzle surface was below 1.0. The analysis results show similar performance between two solvers in terms of the flow around the nozzle vane, the mass flow distribution of the coolant, secondary flow within the passage, and area-averaged cooling effectiveness. However, a slight difference is observed in the maximum acceleration on the suction side. Furthermore, differences in coolant behavior near the wall are observed, and this results lead to difference in the cooling pattern on the suction side. Consequently, the feasibility of using OpenFOAM for the numerical analysis of high-pressure cooled turbine is confirmed.

1. 서 론

가스터빈 엔진은 터빈 입구에서의 작동 유체 온도가 높을수록 엔진의 효율이 향상된다. 그러나 터빈을 포함한 엔진 고온부 구성품들이 내열 한계온도에 도달하지 않도록 냉각 기법의 적용이 필요하다. 가스터빈 엔진의 부품 중 높은 온도에 노출되는 부분 중 하나인 고압터빈에는 내부 냉각, 충돌 제트 냉각, 막냉각 등의 냉각 기법이 연구, 개발 및 적용되었다⁽¹⁻⁵⁾. 고압터빈에 냉각 기법 적용 시 터빈의 냉각 성능을 평가하기 위해 열전달 실험, 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD) 등 여러 방법을 이용한 여러 연구가 수행되고 있다.

CFD를 이용한 고압터빈의 연구는 실험으로 관측하기 어려운 터빈 유로 내의 이차 유동, 내부 유로에서의 냉각 성능 평가, 막냉각 유체의 거동 등에 대한 모사가 가능하다는 장점이 있다⁽⁶⁻¹¹⁾. 이와 같이 고압터빈 연구에 CFD를 이용하는 연구에는 주로 상용 소프트웨어가 사용되었다. 상용 소프트웨어는 솔버의 수렴성과 안정성이 좋다는 장점이 있으나, 솔버 내부의 모든 구조를 사용자가 확인할 수는 없다는 단점이 있다. 그에 비해 오픈 소스 소프트웨어는 내부의 소스 코드가 공개되어 있어 사용자가 해석에 사용된 코드 및 내부 구조를 직접 확인할 수 있다. 또한, 해석 환경, 해석 대상 및 조건에 적합한 수치 모델과 경계 조건을 사용자의 의도에 따라 수정 및 개발이 가능하여 해석의 자유도가 높다. 더욱이

* 과학기술연합대학원대학교 항공우주시스템공학전공(Department of Aerospace System Engineering, University of Science and Technology)

** 한국항공우주연구원(Korea Aerospace Research Institute)

† 교신저자, E-mail : electra@kari.re.kr

상용 소프트웨어는 기본적인 라이선스 비용과 더불어 대규모 연산을 위한 추가 라이선스 비용이 필요하지만, 오픈 소스 소프트웨어는 무료로 사용할 수 있어 비용을 절감할 수 있다. 위와 같은 장점으로 인해 전산유체해석을 위한 여러 오픈 소스 소프트웨어가 개발되었으며, 그중 OpenFOAM은 대표적인 오픈 소스 소프트웨어 중 하나이다. OpenFOAM은 리눅스 기반에서 구동되는 CFD 소프트웨어로, 비압축성 및 압축성 유동, 연소, 열전달, 다상 유동, 구조 해석 등 폭넓은 공학적 문제의 수치해석에 활용할 수 있다⁽¹²⁾. 또한 OpenFOAM은 병렬 연산을 지원하여 많은 계산 자원이 필요한 해석에도 효율적으로 활용할 수 있으며, ESI 그룹과 OpenFOAM Foundation을 비롯한 여러 개발 그룹에서 솔버 개선, 경계 조건 및 물리 모델 개발, 코드 최적화 등과 같은 정기적인 유지·보수를 수행하고 있다는 장점이 있다. 최근에는 WSL 기능을 이용하여 윈도우 환경에서도 활용이 가능해졌으며, NEXTFOAM에서 개발한 OpenFOAM 기반 전산해석 소프트웨어인 BARAM은 윈도우 환경에서 작동 및 GUI 또한 제공하여 사용자의 접근성 및 편의성 또한 향상되었다^(13,14).

현재 OpenFOAM은 공력⁽¹⁵⁻¹⁷⁾, 선박^(18,19), 연소⁽²⁰⁻²²⁾ 등 다양한 분야에서 폭넓게 활용되고 있으며, 가스터빈과 같은 압축성 유체기계 분야에서의 활용 연구도 진행되고 있으나, 해당 분야에서는 아직 가용성을 확인하는 수준에 머물러 있다⁽²³⁻²⁷⁾. 그중 Kang 등⁽²⁶⁾은 무냉각 노즐 베인에 대한 해석을 수행했으며, 터빈 유동 해석에서 OpenFOAM의 가용성을 확인하였다. Kim 등⁽²⁷⁾은 평판에서의 막냉각 유체 거동에 대한 OpenFOAM의 가용성을 확인하였다. 앞선 연구들에서는 무냉각 터빈에서의 유동 및 평판에서의 막냉각 유체 거동에 대한 OpenFOAM의 가용성은 확인하였으나, 실제 냉각 기법이 적용된 터빈 노즐에 대한 열유동 해석에 대해서는 가용성 평가가 수행되지 않았다. 이에 본 연구에서는 터보샤프트엔진의 고압터빈 노즐 베인에 대하여 OpenFOAM을 이용한 RANS 기반의 단일 열유동 해석을 수행하였고, 이를 대표적인 상용 소프트웨어인 Ansys CFX와 비교하여 가용성을 평가하였다.

2. 해석 대상

본 연구의 해석 대상은 Fig. 1과 같이 현재 국내에서 개발 중인 1,000 마력급 터보샤프트엔진에 장착되는 고압터빈의 1단 노즐이다. 해석 대상의 형상과 노즐의 단면도를 Fig. 2, 3에 나타내었다. 해당 노즐 베인은 노즐 상부로부터 냉각 유체가 공급된다. 노즐 베인에 적용된 냉각 기법으로는 노즐 익형의 앞전(Leading edge)을 보호하기 위한 원형 막냉각 홀과 흡입면을 보호하기 위한 확장형 막냉각 홀, 노즐 내부의 핀-핀(Pin-fin) 기법이 적용된 유로와 노즐 익형의 뒷전(Trailing edge)에서 노즐을 보호하기 위한 슬롯(Slot)으로 구성된다.

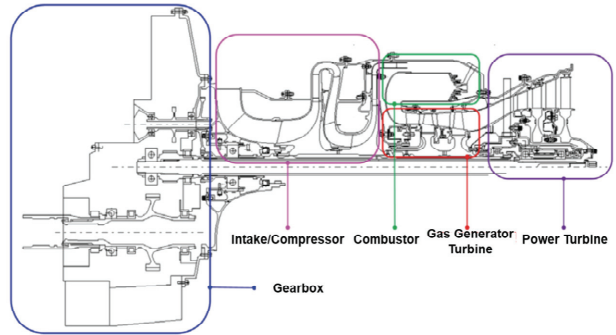
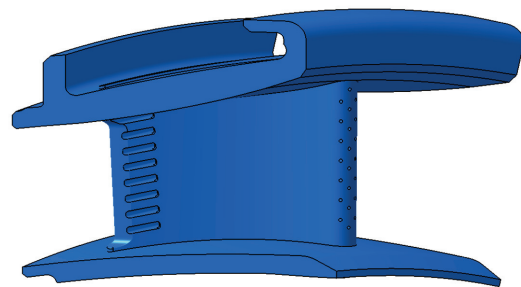
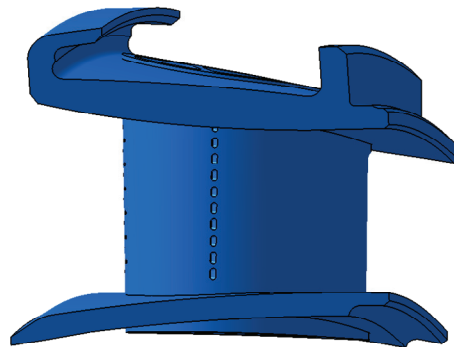


Fig. 1 Layout of 1,000shp class turbo-shaft engine⁽²⁸⁾



(a) Pressure side



(b) Suction side

Fig. 2 High-pressure turbine nozzle vane geometry

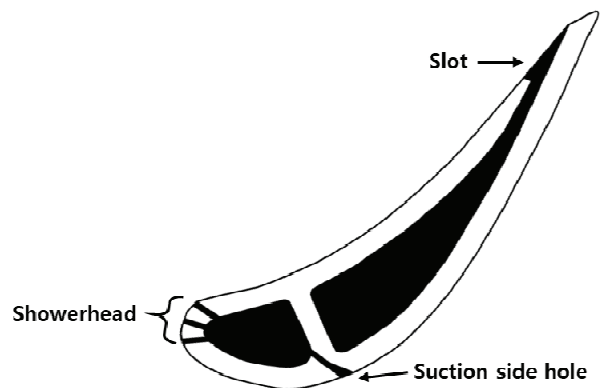


Fig. 3 Cross-sectional view of turbine nozzle

3. 해석 조건 및 방법

본 연구에서는 냉각 터빈 해석에서 OpenFOAM의 가용성 평가를 수행하였다. 이를 위해 가스터빈 연구에 주로 사용되는 상용 소프트웨어인 Ansys CFX를 이용하여 동일 조건에 대한 해석을 수행하였다. OpenFOAM은 ESI 그룹에서 배포한 OpenFOAM_v2212를 사용했으며, CFX는 CFX 2023 R1을 사용하였다. 해석은 모두 RANS를 기반으로 한 압축성 유동 솔버를 사용했으며, 에너지 방정식에 점성 소산으로 인한 영향은 고려하지 않았다. 해석에 사용된 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho \vec{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \otimes \vec{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + S_u \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho h}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho h \vec{u}) - \frac{\partial p}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + S_E \quad (3)$$

여기서 \vec{u} 는 속도, t 는 시간, ρ 는 유체의 밀도, p 는 유체의 압력, τ 는 점성응력텐서, h 는 엔탈피, T 는 온도, λ 는 열전도도를 나타낸다. S_u 와 S_E 는 각 식에서의 소스항을 나타낸다.

Fig. 4에는 해석 영역과 경계 조건을 나타내었다. 격자수를 줄여 계산의 소요 시간을 줄이고자 단일 익형에 대한 유로로 해석 영역을 구성하였다. 노즐의 전후방으로는 각각 익형의 축방향 코드 길이(Axial chord length, C_x) 기준 1.5, 2.0배만큼 확장하였다. 해석의 경계 조건으로 주유동과 냉각 유체가 유입되는 입구에는 전압력(Total pressure), 전온도(Total temperature) 조건 및 5%의 난류 강도를 적용하였으며, 출구에는 정압력(Static pressure) 조건을 사용하였다. 양 측면은 주기 조건(Periodic condition)을 적용하였으며, 해석 영역의 모든 벽면은 단열 조건(Adiabatic condition) 및 점착 조건(Non-slip condition)을 적용하였다.

가스터빈의 연소기 후단에 위치한 고압터빈에는 고온고압

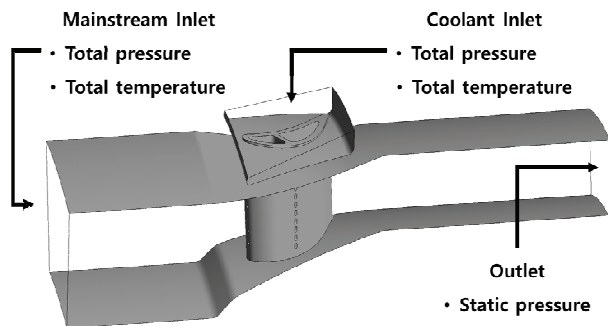


Fig. 4 Boundary conditions for numerical analysis

의 주유동과 냉각을 위한 중온의 공기가 각각 유입된다. 이에 본 해석에서는 작동 유체의 정압비열, 점성, 그리고 열전도율에 대하여 온도에 따른 함수로 적용하였다. 정압비열은 CFX의 경우 온도에 따른 다항식 함수를 적용했으며 OpenFOAM은 JANAF 방식을 이용하여 동일한 함수를 적용하였다. 점성은 Sutherland's law, 열전도율은 Modified Eucken correction을 적용하였다^(29,30). 각 해석에 적용한 열 물성 모델을 정리하여 Table 1에 나타내었다.

압축성 유동 해석을 위한 솔버로 CFX는 Coupled solver 방식을 사용하며, OpenFOAM은 Segregated solver 방식의 솔버를 사용한다. 본 연구에서는 OpenFOAM의 솔버 중 압축성 유동 해석이 가능한 rhoPimpleFoam을 사용하였다. 해석의 시간 차분법은 정상상태(Steady state)의 조건으로 수행했으며, OpenFOAM의 경우 해의 수렴성 향상을 위해 Local time stepping(LTS)기법을 적용하였다⁽²²⁾. 대류항 차분법에 대하여 CFX는 High resolution, OpenFOAM은 2nd order upwind를 적용하였다. 해당 차분법들은 이전 Kim 등⁽²⁷⁾의 연구에서 제시한 바와 같이 2차 정확도를 갖는 차분법으로 본 연구에서는 동일 정확도 수준의 차분법을 사용하여 계산을 수행하였다. 난류 모델은 터빈 유동해석에서 주로 사용되는 $k-\omega$ SST model을 사용하였으며, 난류 성분의 계산 시에는 두 해석 모두 1차 정확도를 갖는 차분법을 사용하였다. 본 해석에 사용한 수치 기법을 Table 2에 정리하였다.

본 연구에서 OpenFOAM을 이용한 계산은 한국과학기술정보연구원의 슈퍼 컴퓨터 누리온을 활용하여 수행하였다. 누리온은 Inlet Xeon Phi 7250 1.4 GHz로 이뤄진 Knight Landing(KNL)과 Intel Xeon 6148 2.4 GHz로 이뤄진 Skylake(SKL)로 구성되어 있으며, 본 해석에서는 전체 코어 수가 약 56만 개의 KNL 코어 중 512개의 코어를 사용하여 해석을 수행하였다.

Table 1 Summary of thermodynamic properties

	Ansys CFX	OpenFOAM
Heat capacity at constant pressure	Polynomial Eq.	JANAF
Viscosity	Sutherland's law	
Thermal conductivity	Kinetic theory	

Table 2 Summary of numerical schemes

	Ansys CFX	OpenFOAM
Solver	CFX 2023 R1 (Coupled solver)	rhoPimpleFoam (Segregated solver)
Temporal scheme	Steady state	Steady state with LTS
Convection scheme	High resolution	2nd order upwind
Turbulence model	$k-\omega$ SST model	
Turbulence scheme	1st order upwind	

해석에 사용한 격자계는 Ansys Mesh를 이용하여 생성하였으며 두 솔버 모두 동일 격자계를 이용하였다. OpenFOAM의 경우 내장된 격자 변환(Mesh conversion) 유틸리티인 fluent3 DMeshToFoam을 이용하여 Ansys Mesh에서 생성된 격자계를 OpenFOAM에서 사용하는 격자 파일의 형태로 변환하여 사용하였다.

해석 대상인 노즐 베인은 표면에 막냉각 홀이 적용된 형태로 벽면 근처에서의 열유동 해석을 위해 노즐 표면에서 평균 y^+ 값이 1.0 이하가 되도록 격자계를 구성하였다. 격자 의존성을 확인하기 위해 격자 크기를 변경하여 총 6개의 격자계를 생성하였으며, 각각 생성한 격자계의 격자수를 Table 3에 나타내었다. 격자 의존성 판단을 위해 각 케이스에 대하여 동일 조건으로 해석을 수행했으며, 노즐 표면에서의 면적 평균 단열 냉각 효율을 비교하였다. 단열 냉각 효율은 노즐 주유동의 온도와 공급되는 냉각 유체의 온도를 기반으로 무차원화하여 나타낸 값이며 정의는 다음의 식(4)와 같다.

$$\eta = \frac{T_{gas} - T_{aw}}{T_{gas} - T_{coolant}} \quad (4)$$

위 수식에서 T_{gas} 은 주유동의 온도, $T_{coolant}$ 는 냉각 유체의 온도, 그리고 T_{aw} 은 단열 벽면 온도를 뜻한다. 벽면의 경계 조건은 단열 조건으로 단열 벽면 온도는 유동에 따른 열 경계층을 통해 계산된다. 격자 의존성 판단을 위해 격자수에

Table 3 Number of elements for mesh dependency test

#	No. of cells
Case 1	6.55×10^6
Case 2	1.14×10^7
Case 3	1.31×10^7
Case 4	1.62×10^7
Case 5	2.04×10^7
Case 6	2.45×10^7

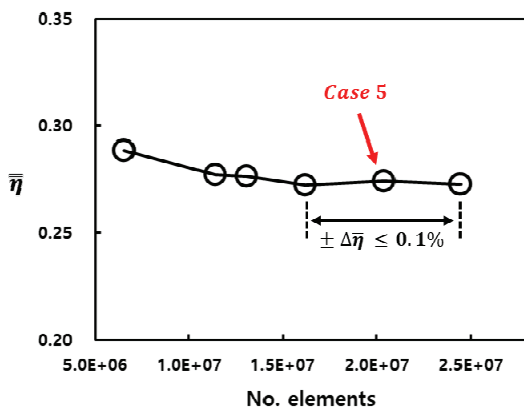


Fig. 5 Result of mesh dependency test using Ansys CFX

따른 노즐 표면에서의 면적 평균 단열 냉각 효율을 Fig. 5에 나타내었다. 해석은 동일 조건에 대하여 CFX를 이용하였으며, 격자수가 약 1천 6백만개 이상인 격자계에 대하여 면적 평균 단열 냉각 효율이 수렴하는 것을 볼 수 있다. 약 1천 5백만개 이상의 격자계를 사용 시 면적 평균 단열 냉각 효율의 오차가 0.1% 이하인 것으로 나타났으며, 이에 격자수가 약 2천만개(Case 5)인 격자계를 선정하여 각각의 솔버를 통해 열유동 해석을 수행하였다. Fig. 6에는 선정한 격자계의 노즐 앞전과 뒷전에서의 격자 단면을 나타내었다.

4. 해석 결과

Fig. 7에는 노즐 앞전을 기준으로 $-0.2 C_x$ 지점에서의 유속과 난류 강도를 원주 방향으로 평균한 프로파일을 나타내었다. 유입되는 유동은 두 해석 결과가 거의 일치한다. 유속 프로파일에서 허브(Hub) 부근의 유속이 더 높게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이는 허브 벽면 근처의 유동이 수축되는 유로를 타고 가속하여 나타나는 현상으로, 슈라우드(Shroud) 근처의 유동에 비해 상대적으로 빠른 유속 및 얇은 경계층 두께를 갖는다.

Fig. 8은 미드스팬(Mid-span)에서의 마하수 분포를 나타내었다. CFX와 OpenFOAM의 결과 모두 익형의 흡입면 부분에서 유동의 가속이 나타난다. 흡입면의 가속 영역에서 최대 마하수가 약 5% 차이이나 전체적인 패턴은 유사하게 나타난다. Fig. 9에는 미드스팬에서의 등엔트로피 마하수(Isentropic Mach number)를 나타내었다. 등엔트로피 마하수에서 CFX

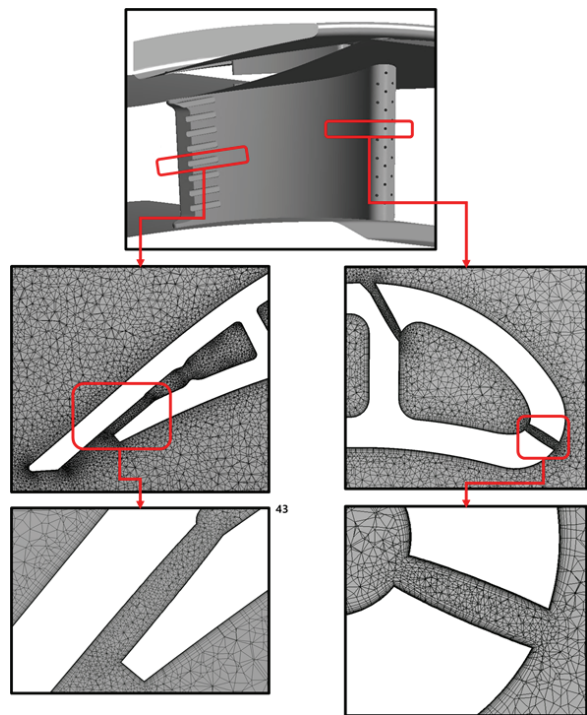


Fig. 6 The generated mesh for case 5

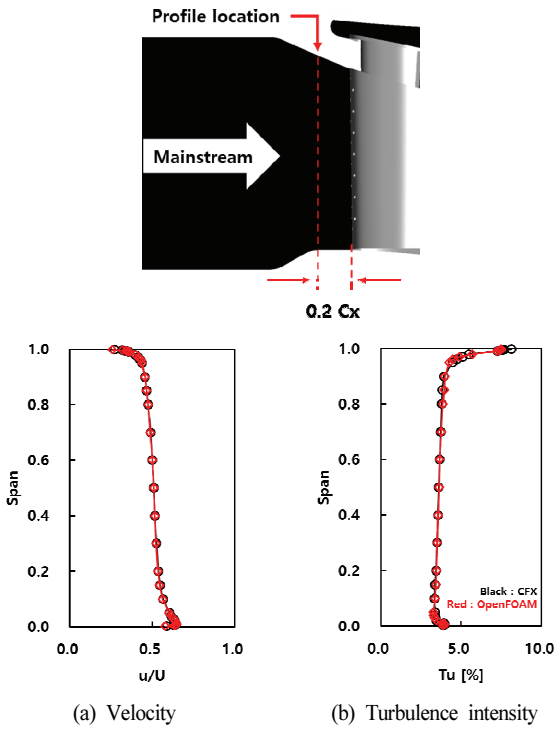


Fig. 7 Velocity and turbulence intensity profile at $-0.2 C_x$ from leading edge of nozzle

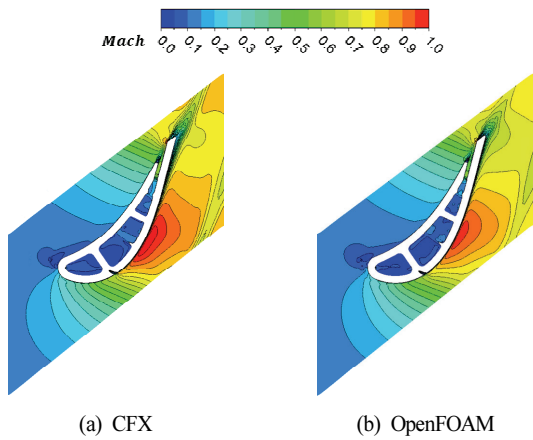


Fig. 8 Mach number contour plots at mid-span

의 결과는 최대값이 $x/C_x=0.72$ 지점에서 나타나는 반면, OpenFOAM은 $x/C_x=0.75$ 지점에서 나타난다. 마하수 분포와 같이 가속 영역에서 일부 차이가 나타나 전체적인 영역에서는 거의 유사한 것을 확인할 수 있다.

Fig. 10에는 압력면, 흡입면에서의 정압력 분포를 노즐 전 후단의 압력을 이용한 무차원값으로 나타내었으며, Fig. 11에는 전체 냉각 유체 공급 유량 대비 각 홀에서 분사되는 냉각 유체의 유량비를 나타내었다. 두 해석 결과에서 표면의 압력 분포가 유사하고 유량비 또한 차이가 0.6 % 이하로 나타나 두 결과가 거의 유사하다고 볼 수 있다.

Fig. 12에는 노즐 표면에서의 단열 막냉각 효율 분포를 나

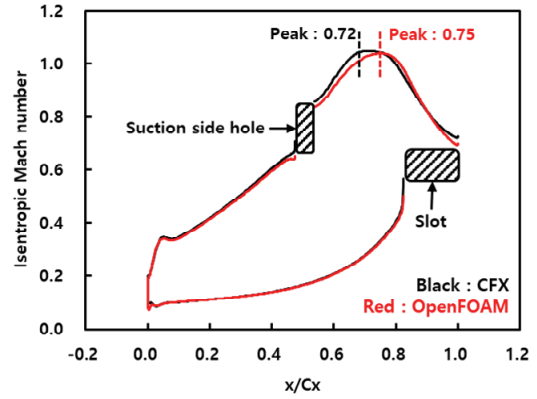


Fig. 9 Isentropic Mach number at mid-span nozzle surface

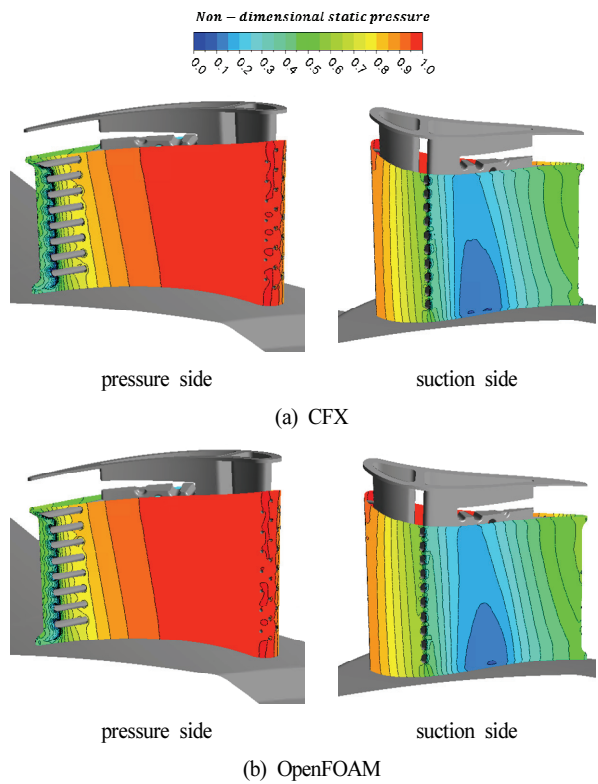


Fig. 10 Non-dimensional static pressure contour plots at nozzle surface

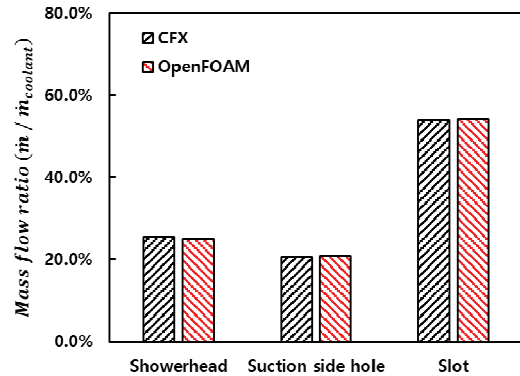


Fig. 11 Coolant mass flow ratio at each cooling holes

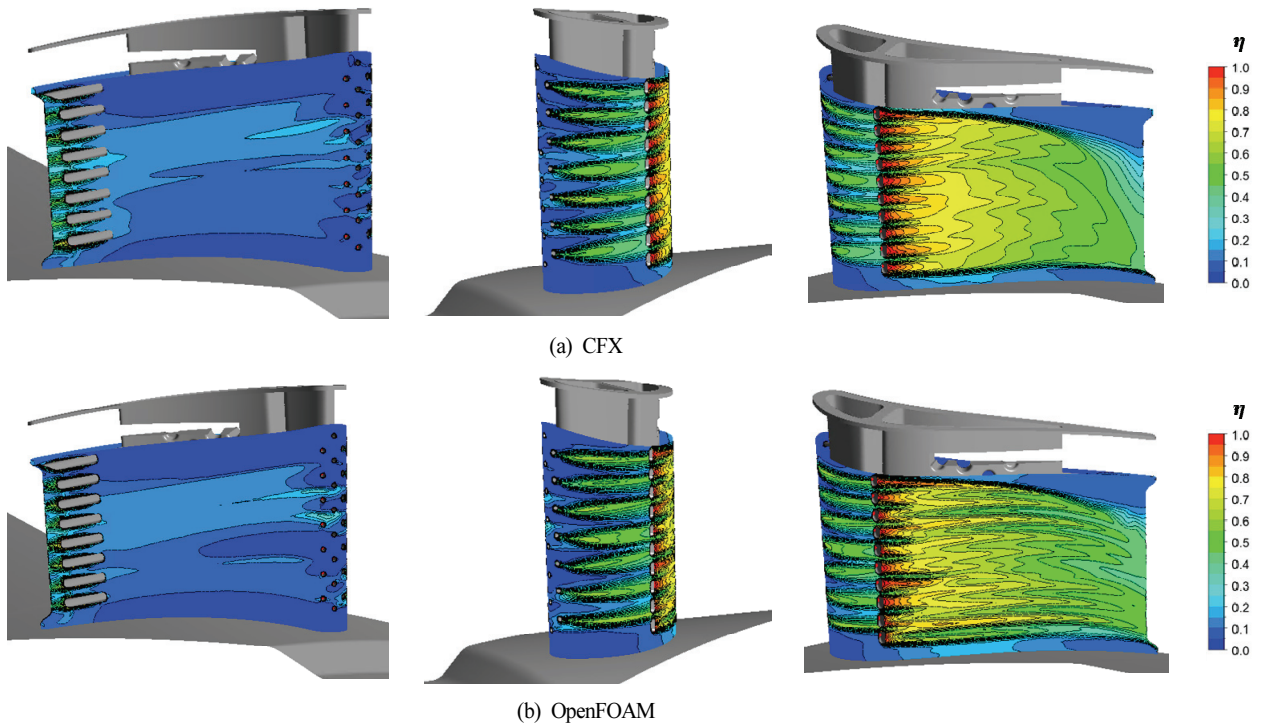


Fig. 12 Adiabatic film cooling effectiveness contour plots on the nozzle surface

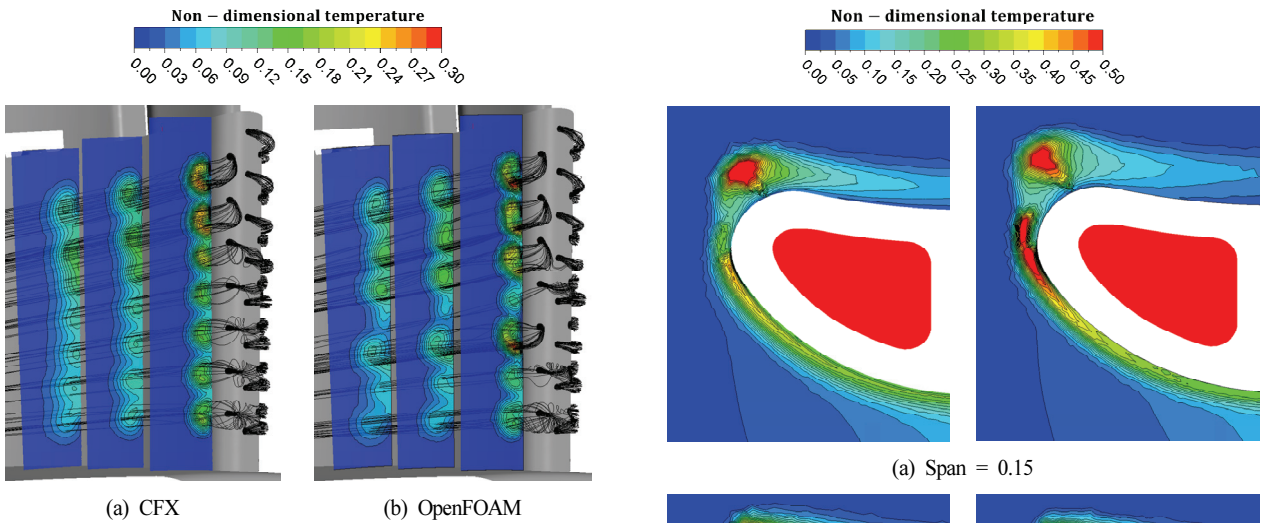


Fig. 13 Non-dimensional temperature contour plots at pressure side passage with streamline from the showerhead hole

타내었다. 압력면 단열 막냉각 효율 분포는 두 해석 결과 모두에서 전반적으로 낮은 값을 보였다. Fig. 13에는 노즐 앞전에 위치한 냉각 홀로부터 분사되는 냉각 유체의 유선과 압력면 유로에서의 무차원 온도장을 나타내었으며, Fig. 14은 스펠 15, 82 %에서 노즐 앞전 부분의 무차원 온도장을 나타내었다. 분사된 냉각 유체가 압력면 방향으로 흘러가나 냉각 유체가 표면에 잘 부착하지 못하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 냉각 유체의 거동으로 인해 노즐 압력면에서는 냉각 유체가 압력면으로 흘러감에도 낮은 냉각 성능을 보여준다.

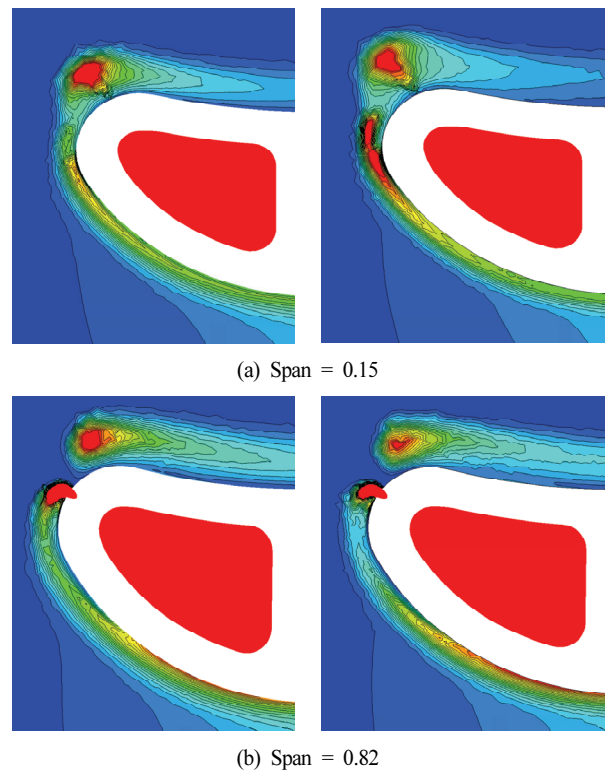


Fig. 14 Non-dimensional temperature contour plots at span 15 and 82% (left : CFX, right : OpenFOAM)

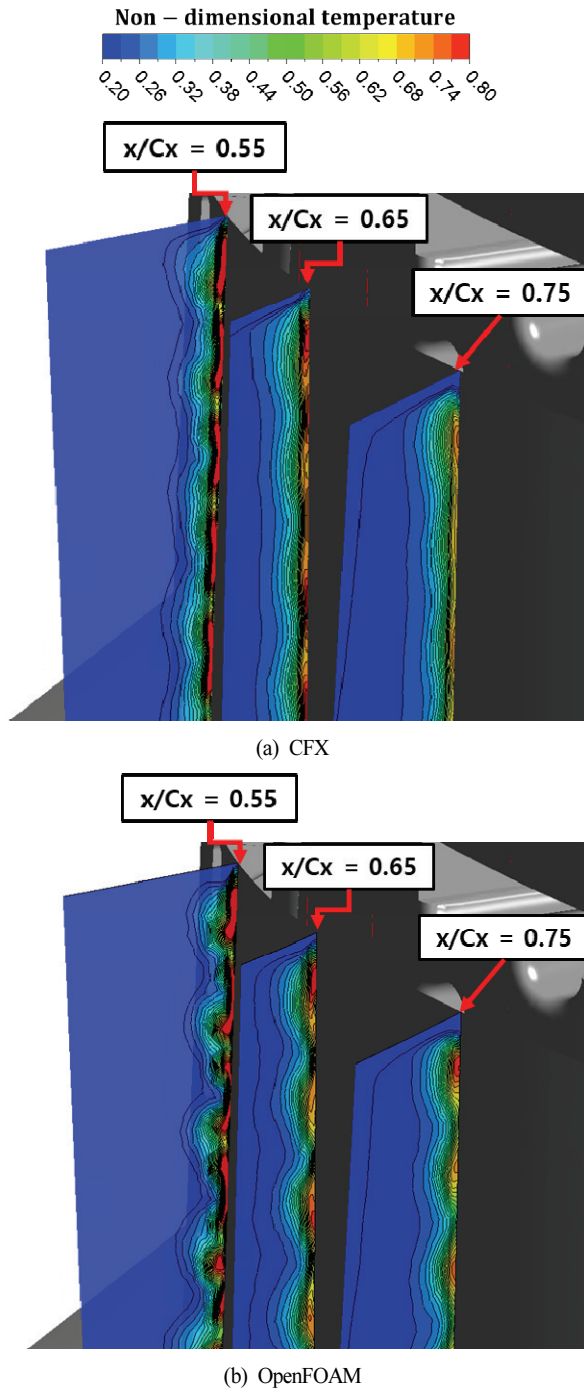


Fig. 15 Non-dimensional temperature contour plots at suction side passage

Fig. 12에서 흡입면의 경우 분사된 막냉각 유체가 벽면에 잘 부착되어 높은 냉각 효율을 보여준다. 그러나 동일 유동 조건에서 CFX의 결과와 OpenFOAM의 결과가 다른 냉각 패턴을 보여준다. Fig. 15, 16에는 흡입면 하류에서의 무차원 온도장과 스펀 방향으로의 단열 냉각 효율을 나타내었다. Fig. 15에서 CFX의 결과는 스펀방향으로 냉각 유체가 분산되어 이웃의 냉각 유체와 상호 작용을 하는 경향을 보인다.

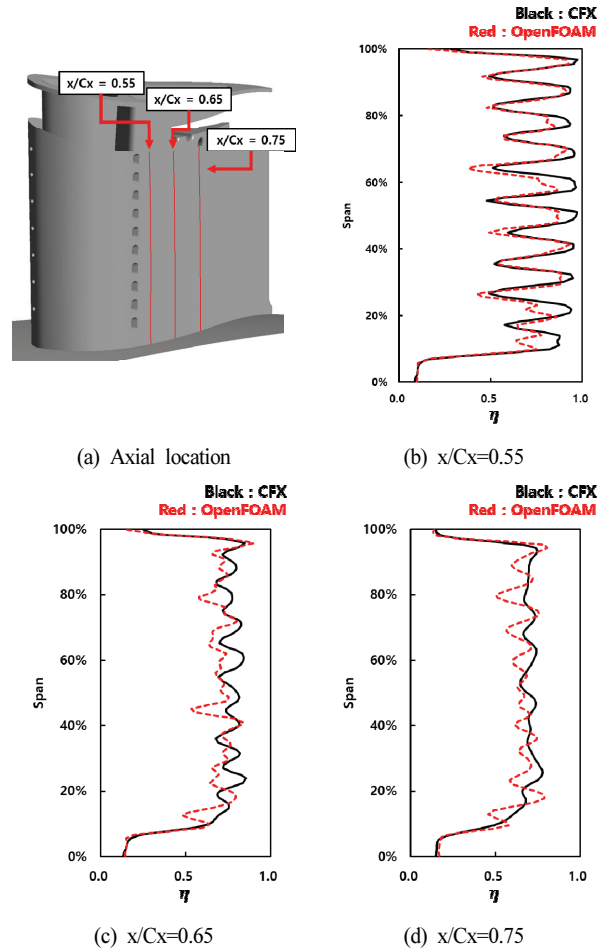


Fig. 16 Cooling effectiveness at each axial chord

그러나 OpenFOAM의 결과는 상대적으로 이웃의 냉각 유체 간의 상호 작용이 약하게 나타난다. 이러한 냉각 유체의 거동 차이로 인해 흡입면에서의 단열 냉각 효율 패턴이 다르게 나타나며 Fig. 16과 같이 OpenFOAM 대비 CFX는 상대적으로 균일한 냉각 성능을 보인다. OpenFOAM과 CFX의 냉각 유체 거동 차이는 이전 Kim 등⁽²⁷⁾이 수행한 평판 막냉각 유동 연구에서도 유사하게 나타났었다. 이는 솔버간 벽면 근처에서의 해석 방식에 대한 차이 혹은 차분법의 인공 소산에 의한 온도 확산 차이로 인해 나타난 것으로 추측된다.

터빈 내부에는 유로를 따라 흐르는 유동 외에도 복잡한 이차 유동이 나타난다. 이러한 이차 유동은 터빈 내에서 전압력 손실과 더불어 냉각 성능을 감소시킨다. Fig. 17에는 노즐 표면의 단열 냉각 효율과 함께 흡입면 유로의 슈라우드, 허브 부근에서 나타나는 이차 유동을 우선으로 나타내었다. 두 해석 결과 모두 이차 유동의 거동이 유사한 경향성이 나타나는 것을 확인할 수 있다. 위와 같이 나타나는 이차 유동은 막냉각 효율을 통해 분사된 냉각 유체를 벽면에 밀착하지 못하게 하여 단열 냉각 효율을 저하시킨다. 슈라우드 부근에서 나타나는 이차 유동은 허브 부근에 나타난 이차 유동에 비해 상대적으로 크게 나타난다. Fig. 7에 나타낸 유속 프로

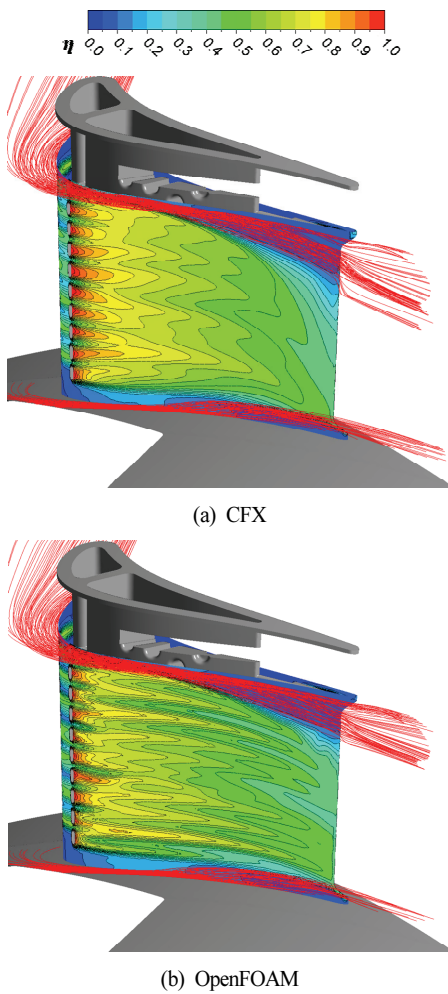


Fig. 17 Adiabatic cooling effectiveness contour at nozzle surface with secondary flow streamline at suction side

파일과 같이 허브 부근은 얇은 경계층 두께를 보이나, 슈라우드는 상대적으로 두꺼운 경계층 두께를 갖는 주유동이 유입된다. 이차 유동은 유입되는 경계층 두께가 두꺼워짐에 따라 더 크게 발달하고 이러한 이차 유동의 영향으로 인해 냉각 유체가 보호하는 영역에 차이가 발생한다.

Fig. 18에는 스펬방향으로 평균된 단열 냉각 효율을 나타내었으며, Table. 4에는 노즐 표면에서의 면적 평균 단열 냉각 효율을 나타내었다. Fig. 18의 $0.50 \leq x/C_x \leq 0.85$ 영역에서 CFX의 결과가 OpenFOAM 대비 높은 스펬 평균 냉각 효율을 보인다. 해당 영역은 흡입면 Suction side hole의 하류로 CFX의 결과는 OpenFOAM 대비 냉각 유체가 스펬방향으로 잘 분산되어 냉각 흡 사이 영역도 보호하기 때문에 상대적으로 높은 값을 보인다. 그 외의 영역에서는 거의 동일한 값을 보여주며, 면적 평균 냉각 효율 또한 거의 일치하는 값을 보인다.

5. 결 론

본 연구는 가스터빈의 고압터빈 노즐 베인의 열유동 해석

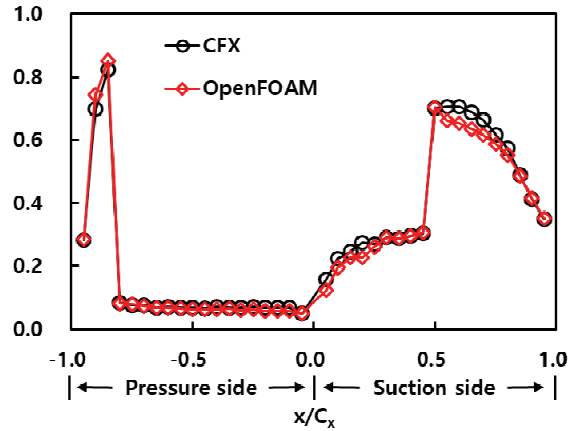


Fig. 18 Spanwise-averaged cooling effectiveness

Table 4 Results of area-averaged cooling effectiveness

	Area-averaged cooling effectiveness
CFX	0.274
OpenFOAM	0.270

에 대하여 오픈 소스 소프트웨어인 OpenFOAM을 이용하여 전산유체해석을 수행했으며 가용성 판단을 위해 상용 소프트웨어인 Ansys CFX를 이용하여 동일 조건에 대하여 해석을 수행 및 비교를 하였다. 해석 영역은 단일 노즐에 대해 전후단으로 유로를 연장하였으며 경계 조건으로는 입구에 전압력, 전온도 조건, 출구에는 정압력 조건을 적용하였다. 측면부는 주기 조건이며, 벽면은 단열 및 점착 조건을 적용하였다. 해석에 사용된 격자계는 노즐 표면의 평균 y^+ 값이 1.0 이하가 되도록 구성했으며, 노즐 표면의 면적 평균 냉각 효율을 기준으로 약 2천만개인 격자계를 선정하였다. 해석에 사용한 수치해석 기법은 이전 연구를 참고하여 동일 정확도의 차분법 및 난류 모델을 사용하였다.

OpenFOAM과 CFX의 해석 결과에서 노즐 주변의 유동, 냉각 흡에서의 분사되는 냉각 유체 유량비, 터빈 유로내의 이차 유동, 전체적인 단열 냉각 성능과 같은 전반적인 성능면에서 거의 일치하는 결과를 보여준다. 그러나 흡입면에서의 최대 가속에 차이가 나타난다는 점과 벽면 근처에서의 냉각 유체 거동이 다르게 나타나 냉각 효율 패턴에 차이가 나타나는 것을 확인할 수 있다.

이전의 Kang 등⁽²⁶⁾과 Kim 등⁽²⁷⁾의 연구에서 터빈 노즐의 공력 해석과 평판에서의 막냉각 유동 해석에 대한 OpenFOAM의 가용성을 확인하였다. 본 연구에서는 두 경우가 함께 적용된 고압터빈 노즐 베인에 대한 열유동 해석을 수행하였다. 일부 유동 특성에 차이를 보이나 노즐 표면의 압력 분포, 노즐 주변의 마하수 분포, 각 냉각 홀로의 냉각 유체 분배 유량비, 면적 평균 단열 냉각 효율과 같은 냉각 터빈의 성능을 평가하는 지표가 상용 소프트웨어인 Ansys CFX를 사용한 결과와 유사한 것을 확인했으며, 냉각 기법이 적용된 고압터빈 노즐 베인 열

유동 해석에서 OpenFOAM의 가용성을 확인할 수 있다.

후 기

본 연구는 방위사업청의 재원으로 국방기술진흥연구소의 지원을 받아 ‘가스발생기 고온부 설계/해석 품질 적합성 검증’ 과제(KRIT-CT-22-042)의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

- (1) Koff, B. L., 2004, “Gas Turbine Technology Evolution: A Designer’s Perspective,” *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 20, No. 4, pp. 577–595.
- (2) Bogard, D. G., and Thole, K. A., 2006, “Gas Turbine Film Cooling,” *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 22, No. 2, pp. 249–270.
- (3) Bunker, R. S., 2017, “Evolution of Turbine Cooling,” *Proceedings of ASME Turbo Expo 2017*, GT2017–63205.
- (4) Haruyuki, T., Chiyuki, N., Syu, F., Yasuhiro, A., and Masato, I., 2008, “Development of Simple and High-Performance Technology for Turbine,” *IHI Engineering Review*, Vol. 41, No. 1, pp. 20–31.
- (5) Unnikrishnan, U., and Yang, V., 2022, “A review of cooling technologies for high temperature rotating components in gas turbine,” *Propulsion and Power Research*, Vol. 11, No. 3, pp. 293–310.
- (6) Haydt, S., and Lynch, S., 2018, “Cooling Effectiveness for a Shaped Film Cooling Hole at a Range of Compound Angles,” *Proceedings of ASME Turbo Expo 2018*, GT2018–75726.
- (7) Effendy, M., Yao, Y., Sugati, D., and Tjahjono, T., 2019, “Numerical Study of Pin-fin Cooling on Gas Turbine Blades,” *AIP Conference Proceedings*, 2114, 060022.
- (8) Song, Y. J., Park, S. H., Kang, Y. J., and Kwak, J. S., 2021, “Effects of trench configuration on the film cooling effectiveness of a fan-shaped hole,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 178, 121655.
- (9) Salvadori, S., Ottanelli, L., Jonsson, M., Ott, P., and Martelli, F., 2012, “Investigation of High-Pressure Turbine Endwall Film-Cooling Performance Under Realistic Inlet Conditions,” *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 28, No. 4, pp. 799–810.
- (10) Bang, M., Choi, S., Choi, S. M., Rhee, D.-H., Moon, H. K., and Cho, H. H., 2022, “Augmented cooling performance in gas turbine blade tip with slot cooling,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 201, 123664.
- (11) Kang, Y. S., Chung, H., Rhee, D.-H., Son, K., Kim, S., Lim, B., Ahn, C., and Lee, B., 2023, “Conjugate Heat Transfer Analysis for 1.5 Stage High-Pressure Turbine,” *The KSFM Journal of Fluid Machinery*, Vol. 26, No. 4, pp. 21–28.
- (12) Park, J. K., and Kang, K. H., 2010, “Review on OpenFOAM – An Open Source Software,” *Korean Society for Computational Fluids Engineering*, Vol. 15, No. 3, pp. 46–53.
- (13) www.openfoam.com
- (14) Kim, B.Y., 2021, “OpenFOAM based CFD package, BARAM-v6.3 release,” *Proceedings of the 2021 Korean Society for Computational Fluids Engineering Fall Conference*, pp. 51.
- (15) Lee, S., Oh, S., Choi, S., Lee, Y., and 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.
- (16) Segui, M., Abel, F. R., Botez, R. M., and Ceruti, A., 2022, “High-fidelity aerodynamics modeling of an aircraft using OpenFOAM – application on the CRJ700,” *The Aeronautical Journal*, 126, pp. 585–606.
- (17) Mkoyan, R., Romanova, D., Sargsyan, S., and Epikhin, A., 2023, “Aerodynamics Analysis of Delta Wing Aircraft and Effect of the Propeller using OpenFOAM,” *2023 Ivannikov Ispras Open Conference*, pp.96–100.
- (18) Wang, J.-H., Zhao, W. W., and Wan, D. C., 2019, “Development of naoe-FOAM-SJTU solver based on OpenFOAM for marine hydrodynamics,” *Journal of Hydrodynamics*, Vol. 31, pp. 1–20.
- (19) Seo, S., Song, S., and Park, S., 2016, “A Study on CFD Uncertainty Analysis and its Application to Ship Resistance Performance Using Open Source Libraries,” *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, Vol. 53, No. 4, pp. 329–335.
- (20) Collonval, F. B., 2015, “Modeling of auto-ignition and NOx formation in turbulent reacting flows,” *Doctoral Dissertation*, Technische Universitat Munchen.
- (21) Lim, D., Lee, J., Kang, S. H. and Seo, S., 2016, “Numerical Investigation of a Gasdynamic Igniter with the OpenFOAM,” *Proceedings of the 2016 KSPE Fall Conference*, pp. 12–16.
- (22) Pang, K. M., Ivarsson, A., Haider, S., and Schramm, J., 2013, “Development and validation of a local time stepping-based PaSR solver for combustion and radiation modeling,” *Proceedings of 8th International OpenFOAM Workshop*.
- (23) Hanimann, L., Mangani, L., Casartelli, E., Mokulys, T., and Mauri, S., 2013, “Development of a Novel Mixing Plane Interface using a Fully Implicit Averaging for Stage Analysis,” *Proceedings of ASME Turbo Expo 2013*, GT2013–94390.

- (24) Anderson, M. R., and Bonhaus, D. L., 2014, "Validation Results for a Diverse Set of Turbomachinery Cases using a Density-Based OpenFOAM Solver," Proceedings of ASME Turbo Expo 2014, GT2014-25977.
- (25) Heinrich, M., Schwarze, R., 2014, "All-Mach Number Density based Flow Solver for OpenFOAM," Proceedings of ASME Turbo Expo 2014, GT2014-26220.
- (26) Kang, S.-H., Chung, H., Kang, Y. S., Jun, S., and Yoon, T. H., 2021, "Compressible flow analysis of turbine-nozzle using open source CFD code," The KSFJ Journal of Fluid Machinery, Vol. 24, No. 1, pp. 19-26.
- (27) Kim, S., Kang, S.-H., Rhee, D.-H., and Kang, Y. S., 2022, "A Study on the Film Cooling Characteristics downstream of Fan-Shaped Cooling Hole on a Flat Plate using OpenFOAM," The KSFJ Journal of Fluid Machinery, Vol. 25, No. 1, pp. 5-15.
- (28) Ko, K., Cho, S.-H., Ahn, C., and Lee, B., 2021, "Preliminary Design of Turboshift Engine for UAV," Proceedings of the KSAS Spring Meeting, pp. 87-90.
- (29) Kadoya, K. Matsunaga, N., and Nagashima, A., 1985, "Viscosity and Thermal Conductivity of Dry Air in Gaseous Phase," Journal of Physical and Chemical Reference Data, Vol. 14, No. 4.
- (30) Svehla, R. A., 1962, "Estimated Viscosities and Thermal Conductivities of Gases at High Temperatures," NASA Tech Rept. R-132.