◎ 논 문
◎ Original Paper

DOI: https://doi.org/10.5293/kfma.2026.29.1.022
ISSN (Print): 2287-9706

TOBI 프리스월 시스템 Inner Seal Inflow 영향성 분석

이현규*† · 이재민* · 김종선* · 조건환*

Effects of Inflow through Inner Seal on TOBI Pre-swirl System

Hyungyu Lee*†, Jaemin Lee*, Jongsun Kim*, Geon-Hwan Cho*

Key Words : Gas turbine(가스터빈), Secondary-air-system(이차유로), Pre-swirl system(프리스월 시스템), Tangential On-Board Injection (접선방향 분사 방식), Inner Seal Inflow(내부 씰 유입류)

ABSTRACT

To improve the performance of aircraft gas turbines, turbine inlet temperature have been continuously increasing. Accordingly, the application of high-temperature materials and sophisticated secondary air system designs have become essential to ensure stable operation under high-temperature conditions. In particular, the pre-swirl system, which transports cooling air with minimal loss, is a critical component for cooling parts exposed to high temperature. In this study, the influence of inflow entering through the cavity of the pre-swirl system on the overall system was numerically analyzed. By comparing the changes in swirl ratio and total temperature drop effectiveness under various inflow mass flow rates, the effect of inflow on the relative total temperature of cooling air at the receiver holes was evaluated. The results showed that inflow with a relatively low swirl ratio reduces the swirl of the cooling air passing through the pre-swirler, thereby increasing the relative total temperature at the receiver holes. Based on these findings, design criteria for allowable inflow and considerations for pre-swirler design are proposed.

Nomenclature

Symbols

A	: nozzle throat area
C_D	: discharge coefficient of total system
C_{DN}	: discharge coefficient of nozzle
$\dot{m}$	: mass flow rate
P	: pressure
r	: radial location
R	: ideal gas constant
T	: temperature
V	: velocity
β	: swirl ratio
κ	: specific heat ratio
η_t	: total temperature drop effectiveness
Ω	: rotating speed

Subscripts

i	: ideal value
N	: location at nozzle throat
s	: static value
t	: total value
Φ	: circumferential component
0	: location at pre-swirl inlet
1	: location at pre-swirl outlet
2	: location at receiver-hole outlet

Acronyms

PS	: Pre-Swirler
RH	: Receiver-Hole

* 한화에어로스페이스 항공엔진사업부 CTO 한국연구소(CTO KR R&D Institute, Aero Engines Business Group, Hanwha Aerospace)
† 교신저자, E-mail : hyun.gyu@hanwha.com

1. 서 론

가스터빈 효율 향상을 위해 터빈 입구 온도(Turbine Inlet Temperature, TIT)는 지속적으로 상승해 왔다. 이에 따라 고온 환경에서도 충분한 수명을 보장하기 위한 고온 재료 개발, 구조 설계 및 냉각 설계가 활발히 연구되어 왔다[1,2]. 냉각설계는 다양한 변수에 의해 영향을 받는데 그 중 냉각 공기의 온도에 큰 영향을 받는다. 냉각 공기는 이차유로(Secondary Air System)의 요구 압력을 고려하여 주유로의 압축기에서 추기하기 때문에 낮은 온도의 공기를 사용하는데 제한적이므로 냉각 공기가 이동하면서 발생하는 온도상승을 최소화하는 방향으로 이차유로를 설계한다. 특히 냉각 공기는 비회전 영역에서 회전 영역을 지남에 따라 손실에 의한 압력 강하 및 온도 상승이 발생하는데, 이를 최소화하는 장치인 프리스월 시스템 설계가 중요하다.

블레이드 냉각을 위해 냉각 공기의 압력과 온도를 최적화하는 장치인 프리스월 시스템(Pre-swirl system)은 냉각 공기를 공급하는 비회전 영역과 회전 영역으로 구성되어 있으며 작은 압력손실로 냉각 공기에 회전 속도 성분을 부여함으로써 회전 디스크와의 상대 속도를 최소화하여 블레이드의 냉각성능을 향상시키는 장치이다. 프리스월 시스템의 노즐인 프리스월러(Pre-swirler)는 분사 방식에 따라 TOBI(Tangential On-Board Injection)와 ROBI(Radial On-Board Injection)로 구분된다. TOBI는 냉각 공기를 접선 방향으로 가속시키며 회전속도 성분을 부여하고, ROBI는 반경 안쪽 방향으로 가속시키며 회전속도 성분을 부여한다. TOBI는 고반경 위치에 설치되어 냉각 공기의 유로 길이를 최소화함으로써 낮은 온도로 블레이드를 냉각할 수 있고, ROBI는 저반경 위치에 설치되어 회전 디스크로 인한 압력 상승을 활용해 높은 압력으로 냉각 공기를 공급한다. 또한 프리스월러는 형상에 따라 홀 타입과 베인 타입으로 나뉘는데, 프리스월 시스템 압력비가 1.3 이상인 대부분의 운전 조건에서 베인 타입이 우수한 성능을 보이지만 블레이드 냉각을 위한 설계 요구도에 여유가 있다면 제작성과 설계 편의성을 고려해 홀 타입을 선택하기도 한다.

Fig. 1에 베인 타입 프리스월 시스템의 개략도를 나타냈다. 프리스월 시스템은 프리스월러, 비회전-회전 영역 사이의 캐비티(Cavity), 회전 속도로 함께 회전하는 리시버홀(Receiver-hole)로 구성된다. 프리스월러를 통과한 냉각 공기는 스월 속도를 유지하며 캐비티를 지나 상대 속도가 낮은 상태로 리시버홀로 유입되어 블레이드 냉각을 가능하게 한다. 프리스월 시스템의 캐비티 영역은 터빈 이차유로의 비회전부와 회전부가 접하는 영역으로, 그 사이에 씰을 설치하여 최대한 기밀을 유지하도록 해야 한다. 그럼에도 불구하고 캐비티로 유입되는 유입류(Inner seal inflow)와 캐비티 밖으로 유출되는 누설은 불가피하기 때문에 유입류 및 누설의 영향에 대해 분석할 필요가 있다.

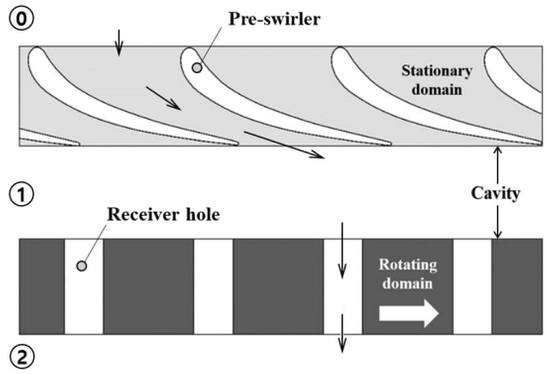

Fig. 1 Schematic of pre-swirl system

Lee et al.[3-8]은 홀 타입 프리스월 시스템을 대상으로 수치해석 연구를 수행하고 실험 결과를 활용해 CFD 해석 기법을 확립했다. 이들은 프리스월러 형상과 리시버홀 위치를 최적화하여 압력 손실을 최소화하고 유출계수를 향상시켰다. 또한 베인 타입 프리스월러에 대해 TOBI 및 ROBI 분사 방식의 특성을 CFD와 실험을 통해 분석하여 유출계수 향상 및 전온도 강하 효율 개선을 달성했고, Extended Vane 설계를 통해 입구 형상에 따른 손실을 최소화한 연구도 수행했다.

최근 프리스월 시스템에 대한 연구는 형상 최적화뿐만 아니라, 주변 이차유로의 영향에 대한 연구도 수행되고 있다. Lin et al.[9,10]은 실험을 통해 프리스월 시스템의 유입류(Inner Seal Inflow) 영향을 줄이기 위한 형상을 제시했다.

본 연구에서는 CFD 해석을 통해 프리스월 시스템 캐비티로 유입되는 유입류가 냉각 공기의 상대 전온도에 주는 영향을 분석했다. 씰을 통과한 유입류의 유량에 따라 프리스월 시스템 출구에서 발생하는 전온도 상승 원인을 온도차 및 스월비 관점에서 분류・평가하고, 유입류 영향을 최소화하기 위한 프리스월 시스템 설계 방안을 제시했다.

2. 본 론

유입류의 유량에 따른 냉각 공기의 변화를 분석하기 위해 프리스월 시스템에서 정의하는 주요 설계 인자에 대해 기술하고, 검증된 CFD 기법을 활용하여 냉각 공기의 스월비 및 상대전온도 변화를 확인했다.

2.1 주요 설계 인자

블레이드 냉각을 위한 냉각 공기의 유량・온도・압력 요구조건을 만족시키기 위해 프리스월 시스템의 성능을 평가하는 설계 인자를 정의해야 한다. 본 연구에서는 프리스월 시스템의 물리적 설계 인자인 스월비(Swirl ratio), 특정 압력비에서 공급 가능한 유량을 평가하는 유출계수(Discharge

coefficient), 프리스월 시스템 입구대비 출구에서의 전온도 강하 효율(Total temperature drop effectiveness)을 통해 유입류의 영향을 분석했다.

2.1.1 스월비

프리스월러를 통과한 냉각 공기는 가속됨과 동시에 스월 속도 성분을 갖는다. 냉각 공기와 리시버홀 간 상대 속도 차이는 압력 및 온도 손실에 직접적인 영향을 미치므로, 스월비는 프리스월러 설계 시 가장 중요한 평가 인자이다. 스월비는 식 (1)과 같이 리시버홀 회전 속도 대비 냉각 공기의 스월 속도 비율로 정의된다.

$$\beta = \frac{V_\phi}{r\Omega} \tag{1}$$

프리스월러 설계 시 리시버홀 입구에서 β = 1을 기준으로 설계하여 압력 손실을 최소화하며 냉각 공기를 블레이드에 공급한다. 블레이드 냉각에 필요한 압력·온도 요구조건에 따라 스월비를 1보다 크게 또는 작게 설계하기도 한다. 분사 방식에 따라 프리스월러를 통과한 냉각 공기의 스월비의 변화가 다르기 때문에 설계 시 분사 방식을 고려하여 적절한 스월비를 만족시키는 노즐을 설계해야 한다. TOBI 분사 방식에서는 동일 반경 구간을 통과하며 캐비티 진입 후 스월비가 점차 감소하나, ROBI 분사 방식에서는 반경 감소 구간에서 각운동량 보존에 의해 스월비가 점차 증가한다. 따라서 TOBI의 경우 프리스월러 직후에서의 스월비는 1 이상, ROBI는 스월비 1 이하를 만족하는 노즐을 기준으로 설계하고, 필요하다면 블레이드 냉각에 필요한 압력이나 온도의 요구 조건에 따라 스월비를 조절하는 설계를 수행한다.

2.1.2 유출계수

냉각 공기가 프리스월 시스템을 통과할 때 발생하는 전압력 손실과 그에 따른 유량 변화를 평가하기 위해 유출계수(Discharge coefficient)를 사용하는데, 식 (2), (3)과 같이 실제 유량을 이론적 최대 유량으로 나눈 비율로 정의되며 프리스월 시스템의 유량 성능과 전압력 손실을 평가하는 지표이다[11].

유출계수는 분석 대상에 따라 노즐 유출계수(C_{DN}), 리시버홀 유출계수, 전체 유출계수(C_D)로 구분되는데, 전체 유출계수는 프리스월러 및 리시버홀에서 발생하는 전압력 손실이 모두 반영되어 이차유로 설계 시 프리스월 시스템의 성능을 대표적으로 평가하는 지표이다. 유출계수는 1을 초과할 수 없으며, 그 값이 클수록 동일 압력비에서 더 많은 유량을 공급하거나, 동일 유량 조건에서 시스템 하류의 전압력이 높음을 의미한다.

$$C_{DN} = \frac{\dot{m}}{\frac{A_N P_{0t}}{\sqrt{RT_{0t}}} \cdot \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa-1} \cdot \left[\left(\frac{P_{1s}}{P_{0t}}\right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left(\frac{P_{1s}}{P_{0t}}\right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa}}\right]}} \tag{2}$$

$$C_D = \frac{\dot{m}}{\frac{A_N P_{0t}}{\sqrt{RT_{0t}}} \cdot \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa-1} \cdot \left[\left(\frac{P_{2s}}{P_{0t}}\right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left(\frac{P_{2s}}{P_{0t}}\right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa}}\right]}} \tag{3}$$

유출계수는 형상에 따른 압력 손실에 영향을 받기 때문에 압력 손실을 최소화하는 프리스월 시스템 설계가 필요하다. 베인 타입 프리스월러가 홀 타입에 비해 압력 손실 측면에서 유리하지만, 서론에서 언급한 대로 블레이드 냉각 요구 조건에 따라 제작성과 설계 편의성을 고려하여 홀 타입을 설계하기도 한다.

2.1.3. 전온도 강하 효율

프리스월 시스템의 주요 목적은 블레이드 냉각이므로, 전온도 강하 효율(η_t)을 평가한다. 식 (4)와 같이 η_t는 실제 전온도 강하량을 이론적 최대 강하량으로 나눈 비율로 정의되며, 값이 클수록 리시버홀 출구에서의 전온도가 더 낮음을 의미한다. (4)

$$\eta_t = \frac{\triangle T}{\triangle T_i} = \frac{T_{0t} - T_{2t}}{T_{0t}\left(1 - \pi^{\frac{1-\kappa}{\kappa}}\right)} \tag{4}$$

프리스월러 설계 시 η_t가 높을수록 더 낮은 전온도의 냉각 공기를 블레이드에 공급할 수 있으나, 전압력 및 유량 요구 조건을 모두 만족시키기 위해 적정 η_t를 설계 지점으로 설정해야 한다. 본 연구에서는 유입류가 없는 Baseline case의 스월비를 1 이상으로 설정하였으며, C_{DN}〉0.95, C_D〉0.90을 만족하도록 설계된 TOBI 형상을 토대로 유입류의 유량 변화에 따른 스월비, 유출계수 및 전온도 강하 효율을 평가했다.

2.2 전산유체역학 모델

2.2.1 전산해석 기법

본 연구에서는 상용 CFD 해석 소프트웨어 ANSYS CFX v2024 R2를 사용하여 정상 상태 해석을 수행했다. 프리스월 시스템 캐비티로 유입되는 유입류의 영향을 분석하기 위해 벽면 근처의 점성 효과와 캐비티 내 스월 현상을 정확히 모사할 수 있는 k-ω based SST 난류 모델을 사용했다. SST 난류 모델은 벽면 근처에서 우수한 예측 성능을 보이는 k-ω 모델과 자유류 영역에서 안정적인 k-ε 모델의 장점을 Blending function으로 혼합한 모델이다[12,13]. 프리스월 시스템 CFD 해석에는 시간 평균화된 Reynolds Averaged

Table 1 Grid dependency test results

	Elements	C_{DN} (Normalized)
Coarse	8.3 M	0.99
Medium	16.8 M	1.00
Fine	22.0 M	1.00

Navier-Stokes(RANS) 방정식을 적용했다. RANS 방정식은 난류 전단응력과 속도 구배 간의 선형 관계를 가정하는 Boussinesq 가정에 기반하며, 비교적 낮은 계산 비용으로도 실험 결과에 근접한 예측 정확도를 제공하기 때문에 회전·비회전 영역을 포함하고 높은 스월 속도를 계산해야 하는 프리스월 시스템 해석에 적합하다.

격자는 벽면 인접 영역에서 Prism 격자를, 캐비티 내부 및 외부 영역에서 Tetrahedral 격자를 사용했다. 격자 의존성 분석을 위해 Table 1과 같이 격자의 밀도에 따른 노즐 유출계수를 비교하여 총 Node 수는 5.8M, Elements 수는 16.8M 개로 결정했으며, 벽면에서 $y^+ < 1$을 만족하도록 격자를 형성했다.

2.2.2 전산해석 영역 및 경계조건

본 연구에서 사용한 프리스월 시스템 해석 도메인은 Fig. 2에 도시한 바와 같이 계산 효율을 위해 프리스월러 4개와

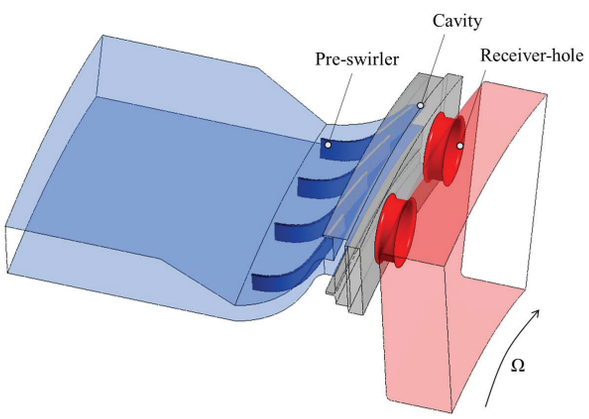

Fig. 2 Pre-swirl system CFD domain

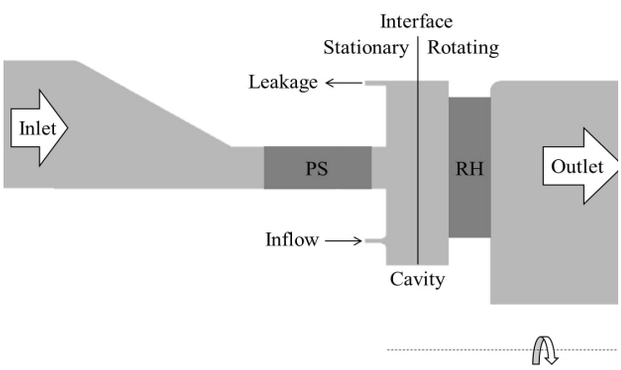

Fig. 3 Boundary conditions

Table 2 Boundary conditions

Inlet	P_t *[bar]*	P
	T_t *[K]*	T
Outlet	P_s *[bar]*	$0.61 \times P$
Inflow	Mass Flow Rate *[kg/s]*	*MFR*
	T_t [K]	$T+50$
Leakage	Mass Flow Rate *[kg/s]*	*MFR*
Interface	Frozen Rotor	-
Fluid	Air (Ideal Gas)	-

리시버홀 2개로 구성하고 주기 조건(Periodic conditions)을 적용했다. 비회전 영역(프리스월러-캐비티)과 회전 영역(캐비티-리시버홀) 사이의 인터페이스는 Frozen rotor를 사용했다. Frozen rotor는 도메인 간 피치 비(Pitch ratio)를 1에 근사하게 유지해야 하는 제약이 있으나, 속도 성분을 원주방향으로 평균화하지 않아 캐비티 내부 스월에 의한 손실, 리시버홀 입구의 유체-벽 간 엔탈피 교환, 유동 박리 현상 등을 정확히 예측할 수 있다.

Fig. 3과 Table 2와 같이 프리스월 시스템 입구 조건은 전압력과 전온도, 출구 경계조건은 정압력으로 설정했다. 캐비티의 하단에서 들어오는 유입류의 유량에 따른 프리스월 시스템의 특성을 분석하기 용이하도록 유량과 전온도를 경계조건으로 사용했다. 유입류의 전온도는 실제 엔진 조건과 비슷하거나 높은 수준으로 냉각 공기의 전온도 대비 50℃ 높게 가정하여 온도 차이에 의한 전온도 상승과 스월비 차이에 의한 전온도 상승을 분석했다. 또한 씰을 통과한 유입류의 특성을 반영하기 위해 경계조건으로 회전속도 성분($\beta = 0.5$)을 부여했다. 누설은 캐비티 하단에서 들어오는 유입류의 유량과 동일한 경계조건을 적용해서 리시버홀을 통과하는 유량을 일정하게 유지시킴으로써 유입류에 의한 스월비와 상대 전온도 변화를 비교 분석했다. 모든 작동유체는 공기로 설정하였으며, 이상기체로 가정하여 온도 변화에 따른 밀도 변화를 고려했다. 본 기법은 참고문헌(3-8)에서 실험 결과와 비교 검증된 프리스월 시스템 해석 절차를 따랐으며, 작동 유체, 난류 모델, 인터페이스 처리 방식 등을 동일하게 적용했다.

2.3 결과

본 절에서는 CFD 해석 결과를 바탕으로 유입류 유량 증가에 따른 냉각 공기의 전온도 변화와 스월비 분포 특성을 분석했다. 프리스월러를 통과한 냉각 공기의 캐비티 내 스월비 분포와 유입류 체적 분율의 분포를 비교했고, 상대 전온도 상승 원인을 정량적으로 평가했다.

2.3.1 스월비 및 상대 전온도 분포

유입류와 누설이 모두 없는 Baseline case에 대해 해석을

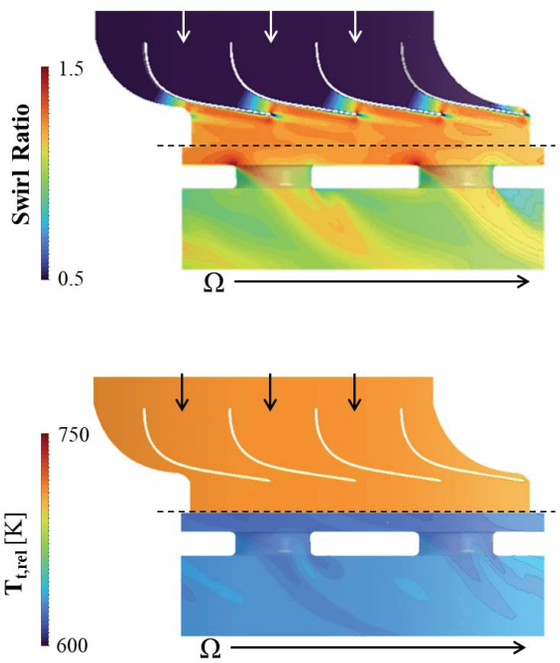

Fig. 4 Swirl ratio & relative total temperature

수행하고, Fig. 4와 같이 리시버홀의 반경 위치에서 스월비와 전온도 분포를 확인했다. 프리스월러를 설계할 때는 리시버홀 입구에서의 스월비=1을 기준으로 하는데, 본 연구에서는 유입류의 영향을 감안하여 Baseline case의 리시버홀 입구 스월비를 1 이상으로 설정했다. 냉각 공기는 프리스월러를 통과하면서 스월비가 점차 증가하고, 캐비티 영역에서는 소폭 감소하며 리시버홀을 통과했다. Baseline case에서는 프리스월러 출구 스월비를 1 이상으로 설정하였으므로, 리시버홀 입구에서 유동의 스월 속도 성분이 유입류의 영향 없이 1 이상으로 유지됨을 확인했다.

상대 전온도는 회전하는 리시버홀 기준으로 정의된 값으로, 비회전 영역에서는 상대 속도가 크기 때문에 컨투어 상의 상대 전온도가 크게 나타났다. 회전 영역에서 전체 유동의 스월비는 1.0~1.2로 리시버홀과의 상대 속도가 작기 때문에 상대 전온도가 전반적으로 낮게 나타났다. 또한, 리시버홀 출구에서 스월비의 편차(1.0~1.2)가 작기 때문에 상대 전온도 분포는 대체로 유사했지만 스월비가 1인 영역에서 낮은 분포를 보였다.

이상으로 Baseline case 해석 결과를 토대로 분석한 스월비 및 상대 전온도 분포를 바탕으로, 이어지는 절에서는 유입류의 유량에 따른 스월비와 상대 전온도 변화를 비교·분석했다.

2.3.2 유입류에 따른 유출계수 변화

유입류의 유량이 증가함에 따른 노즐 유출계수(C_{DN})와 전체 유출계수(C_D)는 동일한 결과를 보였다. 이는 유입류가 프리스월 시스템의 압력손실 측면에서 주는 영향이 적음을 의미한다. 모든 해석 범위에서 노즐 유출계수는 0.95 이상, 전체 유출계수는 0.9 이상이었고, 유입류의 유량에 따른 유출계수는 변함이 없었다.

2.3.3 유입류에 따른 스월비 변화

유입류 유량을 증가시키며 프리스월 시스템 내 스월비 분포 변화를 분석했다. Fig. 5에 유입류의 유량이 냉각 공기 대비 7%(Case A), 14%(Case B), 20%(Case C)인 경우에 대해 리시버홀 반경에서의 스월비 분포를 나타냈다. 유입류가 증가함에 따라 리시버홀 입구에서 낮은 스월비 분포를 보였는데, 특히 Case B, C의 경우 리시버홀의 회전 반대방향으로 치우친 낮은 스월비 분포를 확인했다. 프리스월러 출구에서의 스월비 분포는 유입류의 영향 없이 동일한 분포를 보였다. 측면에서의 스월비 분포는 캐비티로 유입된 유입류가 프리스월러를 통과한 냉각 공기와 혼합 없이 낮은 스월비를 유지하며 리시버홀로 유입됐다. 많은 유입류가 리시버홀로 통과함에 따라 프리스월러 출구의 냉각 공기가 반경 방향으로 치우치는 경향을 보여 유입류가 냉각 공기의 스월비 저하뿐만 아니라 리시버홀의 유효 단면적을 감소시켰다. 이를 통해 프리스월 시스템 설계 시, 유입류의 영향을 고려하여 리시버

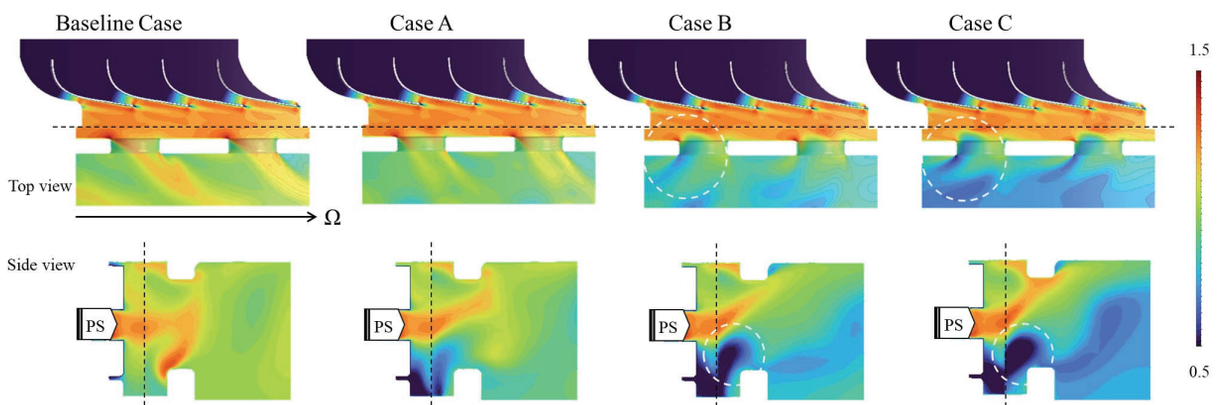

Fig. 5 Swirl ratio contour; Inflow rate of 0%(Baseline case), 7%(Case A), 14%(Case B), 20%(Case C)

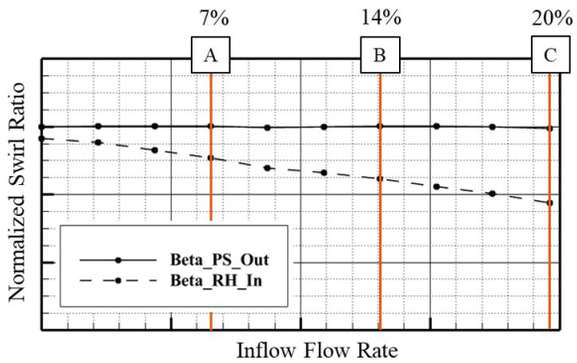

Fig. 6 Swirl ratios along inflow flow rates

홀의 유로 면적을 확보하는 설계가 필요함을 확인했다.

Fig. 6에 제시된 프리스월러 출구 스월비(Beta_PS_Out)는 유입류 유량이 증가해도 일정하게 유지되는 경향을 보였다. 이는 프리스월러 노즐의 성능 자체가 유입류 변화에 민감하지 않음을 의미한다. 반면, 유입류 유량이 증가할수록 리시버홀 입구에서의 스월비(Beta_RH_In)가 선형적으로 감소했다. 유입류의 낮은 스월비로 인해 유입류 유량이 증가할수록 리시버홀 입구에서의 스월비가 영향을 많이 받는 경향을 보였다. 따라서, 프리스월러 설계 시 유입류 유량에 따른 스월비 감소량을 고려한 높은 스월비의 노즐로 설계하면 유입류가 유입되는 상황에서도 목표 스월비를 달성할 수 있음을 확인했다.

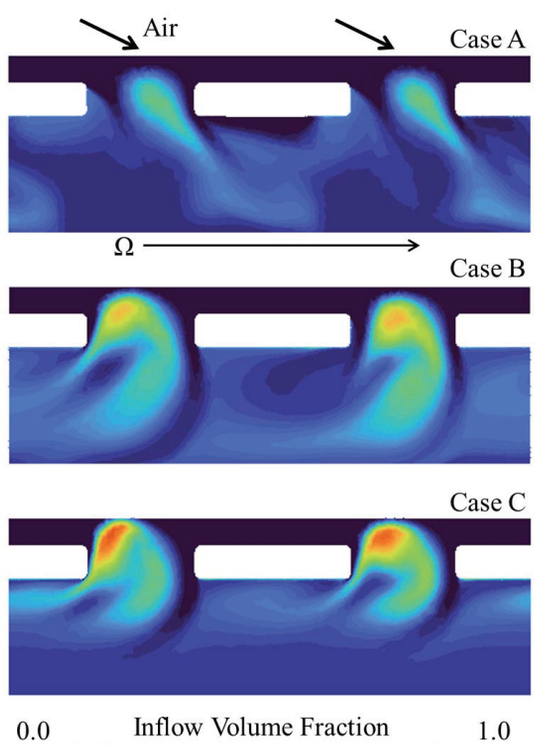

Fig. 7 Inflow volume fraction contour

2.3.4 유입류 체적 분율 분포

Fig. 7에 캐비티 중앙 인터페이스에서 리시버홀 입구까지의 유입류 체적 분율을 나타냈다. 유입류 유량이 증가함에 따라 리시버홀 입구 부근에서의 체적 분율과 분포 범위가 모두 증가했다. 유입류의 유량이 상대적으로 적은 Case A의 경우 냉각 공기가 스월비($\beta \geq 1$)를 유지하며 리시버홀의 회전 방향으로 흘렀다. 유입류의 유량이 증가함에 따라(Case B, C) 리시버홀에서 혼합되지 않은(체적 분율≃1) 유입류가 분포했고 낮은 스월비로 인해 리시버홀의 회전 반대방향으로 치우쳤다. 이 결과로 유입류가 캐비티에서 냉각 공기와 혼합되지 않은 상태로 리시버홀을 통과함을 알 수 있고, 유입류 체적 분율이 높아질수록 혼합공기가 회전 반대 방향으로 치우치는 것을 확인했다.

2.3.5 유입류에 따른 상대 전온도 변화

Fig. 8에 도시한 바와 같이, 유입류 유량이 증가할수록 전온도 강하효율은 선형적으로 감소하고 리시버홀 입구의 상대 전온도가 상승하는 경향을 보였다. 전체 상대 전온도 상승량을 '유입류의 고온 효과에 의한 상승량'과 '스월비 변화에 의한 상승량'으로 분리·분석했다. 유입류의 고온 효과에 의한 상승량은 냉각 공기와 유입류의 질량 비율에 따라 계산했고, 전체 상승량에서 해당 상승량을 제외한 나머지를 스월비 변화에 의한 상승량으로 정의했다. 그 결과, 스월비의 영향이 온도 차이에 의한 영향보다 최대 약 3배 크게 기여함을 확인했다. 이는 프리스월 시스템 설계 단계에서 유입류에 따른 스월비 감소 및 상대 전온도 상승 영향은 반드시 고려해야 함을 시사한다. 더불어, 높은 스월비 설계에 따른 유출계수 감소를 방지하기 위해 유입류의 유량 허용 기준을 제시할 수 있다.

Fig. 9와 같이 상대 전온도 상승 분포는 Fig. 7의 유입류 체적 분율 분포와 동일한 경향을 보였다. 상대 전온도 상승은 리시버홀 입구에서 가장 높은 수치를 보였는데, 이는 유입류로 인해 냉각 공기의 스월비가 저하되면서 리시버홀과

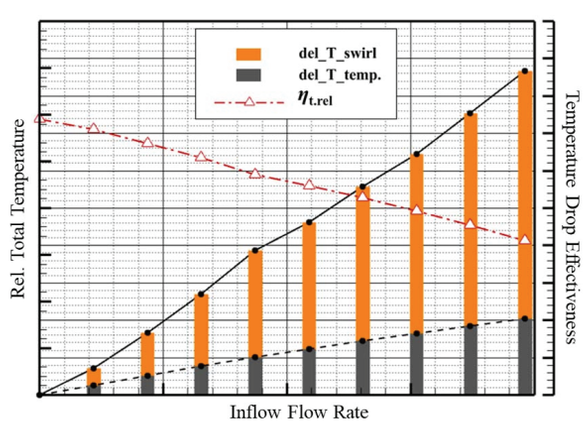

Fig. 8 $T_{t,rel}$ and η_t along inflow flow rates

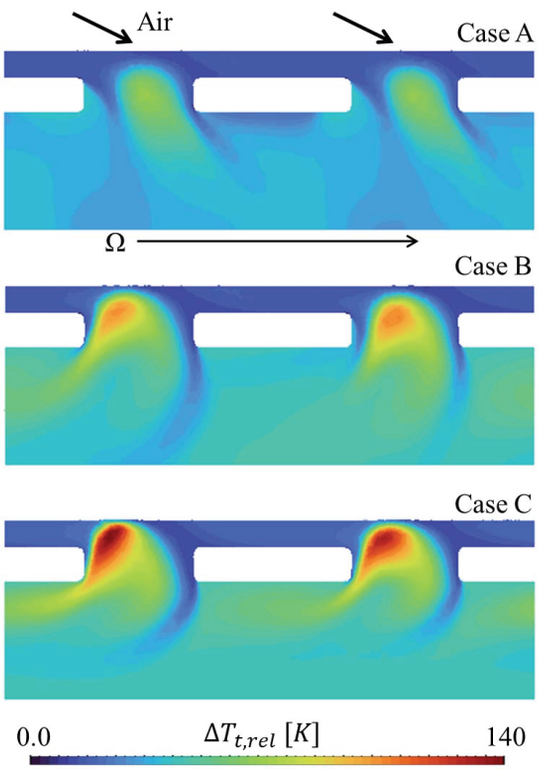

Fig. 9 △Tt,rel contour

의 상대 속도가 증가함에 따라 상대 전온도가 상승했기 때문이다. Case C의 경우 상대 전온도가 최대 약 140 K 상승했는데, 유입류와 냉각 공기의 온도차가 50 K이기 때문에 스월비 저감이 전온도 상승에 주는 영향이 크다는 것을 컨투어로 확인할 수 있다. 위 결과를 토대로 유입류에 따른 상대 전온도 변화 양상을 정량적으로 파악함으로써, 향후 프리스월러 설계 시 유입류 허용 기준을 수립하고, 유입류에 의한 스월비 저감 및 전온도 상승을 고려한 적정 스월비를 갖는 프리스월러 설계의 필요성을 제시할 수 있다.

3. 결 론

본 연구에서는 TOBI 프리스월 시스템의 캐비티 유입류에 의한 전온도 상승에 대해 연구했다. CFD 해석을 통해 유입류의 유량을 증가시키며 프리스월 시스템의 변화에 대해 물리적으로 분석했고, 그 결론은 다음과 같다.

1) 캐비티 유입류가 프리스월 시스템에 유입됨에 따라 프리스월러를 통과한 냉각 공기의 스월비가 감소했다. 프리스월러 출구에서의 스월비 감소는 없었으며, 리시버홀 입구에서 유입류의 영향으로 인해 스월비 감소가 선형적으로 발생했다. 리시버홀 부근에서 유입류의 체적 분율을 분석했으며 유입류의 체적 분율이 높은 부분에서 스월비 감소를 확인했다. 또한 유입류가 리시버홀을 통과함에 따라 냉각 공기가 반경 방향으로 치우침으로써 리시버홀의 유효 단면적이 감소함을 확인했다.
2) 유입류 유량이 증가할수록 전온도 강하 효율은 선형적으로 감소하고 리시버홀 입구의 상대 전온도가 상승하는 경향을 보였다. 전체 상대 전온도 상승량은 '스월비 변화에 의한 상승량'이 '유입류의 고온 효과에 의한 상승량'보다 최대 약 3배 기여함을 확인했다.
3) 본 연구를 통해 유입류에 따른 냉각 공기의 상대 전온도 변화를 파악함으로써 유입류의 유량 허용 기준의 수립 필요성을 제시했다. 또한, 향후 프리스월러 설계 시 유입류에 의한 스월비 저감을 고려한 노즐 설계 필요성을 제시했으며, 리시버홀 설계 시 유입류의 영향을 고려한 유로 면적 확보의 필요성을 제시했다.

후 기

이 논문은 2025년 정부(방위사업청)의 재원으로 국방과학연구소의 지원을 받아 수행된 연구임(UI220082JD)

References

(1) R. C. Ree, 2008, "he Superalloys: Fundamentals and Applications, Cambridge University Press."
(2) Rolls-Royce, 1986, "The Jet Engine," 5th ed.
(3) Lee, H., Lee, J., Kim, D., and Cho, J., 2017, "Pre-swirl Nozzle Geometry Optimization to Increase Discharge Coefficient Using CFD Analysis," The KSFM Journal of Fluid Machinery, Vol. 20, No. 1, pp. 21~28.
(4) Lee, H., Lee, J., Kim, D., and Cho, J., 2019, "Optimization of pre-swirl nozzle shape and radial location to increase discharge coefficient and temperature drop," J Mech Sci Technol Vol. 33, pp. 4855~4866.
(5) Kim, S., Lee, H., Lee, J., Kim, D., and Cho, J., 2018, "Comparative Study on a Tangential and Radial On-Board Injection Pre-swirl System of Gas Turbine Secondary Air System," The KSFM Journal of Fluid Machinery, Vol. 21, No. 1, pp. 19~26, DOI:10.5293/kfma.2018.21.1.019.
(6) Lee, J., Lee, H., Cho, G., and Cho, J., 2020, "System Performance Variation for Relative Location of Pre-swirl Nozzles and Receiver Holes in Radial On-Board Injection Type Pre-swirl System," Journal of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences, Vol. 48, No. 1, pp. 43~53.
(7) Zhang, S., Lee, H., Cho, G., Kim, D., and Cho, J., 2019, "Optimization of Receiver Hole to Improve Discharge Coefficient and Temperature Drop Effectiveness of Gas Turbine Pre-swirl System Using CFD Analysis," The KSFM Journal of Fluid Machinery, Vol. 22, No. 6, pp. 45

~55.

(8) Lee, H, Lee, J, Kim, S, Cho, J, and Kim, D., 2018, “Pre-Swirl System Design Including Inlet Duct Shape by Using CFD Analysis,” ASME Turbo Expo, Vol. 5B, V05BT15A029.

(9) Lin, A., Liu, G., Li, P., Zhang, Z., and Feng., Q, 2022, “Theoretical and Experimental Evaluuations of Pre-swirl Rotor-Stator System with Inner Seal Bypass Configuration for Turbine Performance Improvement,” Energy, Vol. 258, No. 124760.

(10) Lin, A., Liu, G., Wang, X., and Feng., Q, 2021, “Comprehensive evaluations on performance and energy consumption of pre-swirl rotor-stator system in gas turbine engines,” Energy Conversion and Management, Vol. 244, No. 114440.

(11) Dittmann, M., Geis, T., Schramm, V., Kim, S., and Wittig, S., 2002, “Discharge Coefficients of a Preswirl System in Secondary Air Systems,” ASME Journal of Turbomachinery, Vol. 124, No. 1, pp. 119~124.

(12) ANSYS, 2013, “CFX-Solver Theory Guide,” ANSYS Inc., Canonsburg, Pennsylvania, USA.

(13) Menter, L. R., Kunts, M., and Langtry, R., 2003, “Ten Years of Experience With the SST Turbulence Model,” Turbulence, Heat and Mass Transfer, pp. 625~632.