



J. Korean Soc. Aeronaut. Space Sci. 47(12), 881-889(2019)

DOI: <https://doi.org/10.5139/JKSAS.2019.47.12.881>

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

## 가스터빈 프리스윙 시스템의 외기 온도와 터빈 부하 조건에 따른 탈설계점 특성 분석

박현우<sup>1</sup>, 이정수<sup>2</sup>, 조건환<sup>3</sup>, 조진수<sup>4</sup>

### Off-design Characteristics for Ambient Air Temperature and Turbine Load of Gas Turbine Pre-swirl System

Hyunwoo Park<sup>1</sup>, Jungsoo Lee<sup>2</sup>, Geonhwan Cho<sup>3</sup> and Jinsoo Cho<sup>4</sup>Dept. of Mechanical Convergence Engineering, Hanyang University<sup>1</sup>Dept. of Mechanical Engineering, Hanyang University<sup>2,4</sup>Gas Turbine System Integration Team, Doosan Heavy Industries & Construction<sup>3</sup>

#### ABSTRACT

The pre-swirl system is the device that minimizes energy loss of turbine cooling airflow from the stationary parts into rotating parts. In this paper, an off-design analysis was conducted for the ambient air temperature and turbine load conditions. The discharge coefficient was constant for ambient air temperature and turbine load. However, adiabatic effectiveness was increased. This is due to the volume flow rate. The volume flow rate was increased at higher ambient temperature and higher turbine load. It means that the volume of cooling air was increased and the cooling performance of the air was improved. Consequently, adiabatic effectiveness increased by 30.46% at 100% turbine load compared to 20% turbine load. And increased by 18.42% at 55°C ambient air temperature compared to -20°C ambient air temperature.

#### 초 록

가스터빈 이차 유로의 프리스윙 시스템은 터빈의 효율을 높이고 소재의 수명을 연장하기 위해 설치되는 냉각 장치이다. 본 연구에서는 프리스윙 시스템의 설계점을 기준으로 가스터빈 외기 온도와 터빈 부하 변화에 따른 탈설계점 분석을 수행하였다. 탈설계점에서 내부 유동의 특성을 분석하기 위하여 유량계수와 단열계수를 비교하였다. 터빈 부하 증가에 따라 시스템 내부 냉각 공기의 체적 유량이 증가하였고, 단열계수 또한 20% 터빈 부하와 비교하여 100% 터빈 부하에서 30.46% 상승하였다. 외기 온도가 증가할수록 질량 유량과 냉각 공기의 밀도는 감소하였지만 체적 유량은 상승하였으며, 결과적으로 프리스윙 시스템 내부의 냉각 성능은 향상되었다. 프리스윙 시스템 출구에서 -20°C 외기 온도와 비교하여 55°C 외기 온도의 단열계수는 14.82% 향상되었다.

**Key Words** : Ambient Air Temperature(터빈 외기 온도), Gas Turbine(가스터빈), Off-design(탈설계점), Pre-swirl System(프리스윙 시스템), Secondary Air System(이차 유로 시스템), Turbine Load(터빈 부하)

† Received : November 7, 2019    Revised : November 20, 2019    Accepted : November 26, 2019

<sup>1,2</sup> Graduate Student, <sup>3</sup> Senior Researcher, <sup>4</sup> Professor

<sup>4</sup> Corresponding author, E-mail : jscho@hanyang.ac.kr

© 2019 The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences

## Nomenclature

$A_P$	: 프리스윌 노즐 목 면적 ( $m^2$ )	$r$	: 반경 방향 거리 ( $m$ )
$C_{DP}$	: 프리스윌 노즐 출구 유량계수	$y+$	: 무차원 벽면 거리
$C_D$	: 프리스윌 시스템 출구 유량계수	$v_\phi$	: 원주 방향 속도 ( $m/s$ )
$C_P$	: 정압비열 ( $J/kg K$ )	$\beta$	: 스윌비
$P_t$	: 전압 ( $bar$ )	$\kappa$	: 비열비
$P_s$	: 정압 ( $bar$ )	$\dot{m}_{real}$	: 실제 유량
$R$	: 이상기체 상수 ( $J/kg K$ )	$\omega$	: 로터 회전속도 ( $rad/s$ )
$T_t$	: 전온도 ( $K$ )	$\theta$	: 단열계수

## Subscripts

1	: 프리스윌 노즐 입구	3	: 리시버 홀 출구
2	: 프리스윌 노즐 출구	rel	: 상대 위치

## 1. 서 론

발전용 가스터빈은 국내에서 열 병합과 복합화력 발전 시스템에서 많이 사용되고 있으며 이를 복합 사이클로 구성하였을 때 약 60%에 이르는 전력 생산 효율을 가지고 있다. 가스터빈은 압축기에서부터 연소기, 터빈에 이르는 과정을 거쳐 연료의 화학적 에너지를 터빈의 기계적 에너지로 변환시키고, 이를 통해 전기를 생산하는 기계 장치이다. 브레이튼 사이클(Brayton Cycle)을 바탕으로 설계된 가스터빈은 일반적으로 압축기의 압력비와 터빈 입구 온도(Turbine Inlet Temperature, TIT)에 따라 효율에 큰 영향을 받는다. 브레이튼 사이클은 고온부와 저온부 사이의 온도 차이만큼 터빈에서의 에너지가 일로 변환되기 때문에 사이클을 구성하는 압축기의 압력비, 터빈의 고온부와 저온부 사이의 온도 차이가 클수록 발전 효율은 향상되게 된다. 또한 압축기의 압력비가 증가함에 따라 가스터빈의 성능은 최대점에 도달한 뒤 감소하는 경향을 보이며, 터빈 입구 온도가 상승함에 따라 효율이 증가하는 경향을 보인다[1]. 따라서 가스터빈의 발전 효율을 증가시키기 위한 방법으로 터빈의 입구 온도를 상승시키는 연구가 많이 수행되었다. 이때, 터빈 입구 온도 상승으로 인해 베인(Vane)과 블레이드(Blade) 등의 부품들이 고온·고압 공기에 노출되게 되는데, 재료의 파단을 방지하고 수명을 연장하기 위하여 부품의 냉각이 필수적이다.

가스터빈의 이차 유로 시스템(Secondary Air System, SAS)은 터빈의 구성 요소들을 냉각시키기 위하여 설치되며, 압축기에서 추기한 공기를 작동 유체로 사용한다. 따라서 프리스윌 시스템은 비 회전 영역에서 회전 영역으로 냉각 공기가 공급되는 위치에 설치된다. 비 회전 영역의 냉각 공기는 축 방향 속도 성분이 지배적이기 때문에 유동이 회전하는 리시버 홀(Receiver

Hole)로 유입될 때, 비 회전 영역과 회전 영역 사이의 상대적인 속도 차이에 의하여 유동 에너지 손실이 발생하게 된다. 이러한 손실을 최소화하기 위하여 냉각 공기가 리시버 홀로 유입되기 이전에 노즐을 통하여 원주 방향 속도를 부여하는 장치가 프리스윌 시스템이다. 프리스윌 시스템은 터빈 내부 유로에 설치되는 방법에 따라 접선 방향 분사(Tangential On Board Injection, TOBI) 방식과 반경 방향 분사(Radial On Board Injection, ROBI) 방식으로 구분할 수 있으며 형상에 따라 홀(Hole) 형상과 베인 형상으로 구분할 수 있다. 이처럼 프리스윌 시스템은 가스터빈의 설계 조건에 맞게 최적화되어 설치되므로 다양한 조건에서 프리스윌 시스템의 특성에 관한 연구가 활발히 진행되었다.

Dittmann 등[2]은 프리스윌 시스템의 성능을 평가하는 인자로 유량계수를 적용하였다. 유량계수는 이상적인 등 엔트로피 과정에서의 유량 대비 실제 시스템의 유량의 비율로, 1에 가까울수록 프리스윌 시스템의 유동에너지 손실이 작다.

Javiya 등[3]은 단순 홀 형상, 공기역학적으로 설계된 홀 형상, 베인 형상 프리스윌 노즐의 특성을 비교하여, 베인 형상의 프리스윌 노즐이 온도 강하 및 유량계수에 더 유리한 결과를 나타냄을 보였다.

Bricaud 등[4]은 프리스윌 노즐의 반경 방향 위치, 리시버 홀의 직경 및 길이, 캐비티(Cavity)의 높이 및 너비와 같은 프리스윌 시스템 설계에 필요한 다양한 형상 변수들의 영향성에 관한 연구를 진행하였다. 그 결과 시스템의 압력비, 프리스윌 노즐 입구 형상, 프리스윌 노즐과 리시버 홀 간의 면적비가 유량계수에 영향을 미치는 것을 확인하였다.

J. Lee 등[5]은 설계된 베인 형상에 대한 민감도 분석을 통하여 유효한 설계변수를 선정하고 최적화 기법을 사용하여 시스템의 유량계수를 2.86% 증가시켰다.

현재까지 프리스윌 시스템에 관한 연구는 주어진 경

계 조건에서 형상 변수를 변경하여 시스템의 효율을 높이기 위한 연구가 진행되었다. 하지만 가스터빈을 목표한 조건에서 동작시킬 수 있는 환경을 모두 만족 시키기는 어렵기 때문에 다양한 작동 환경에 대한 분석이 필요하다. 특히 탈설계점(Off-design) 분석은 특정 설계점에서 벗어난 환경에서 프리스윙 시스템의 작동 특성을 확인하고, 가스터빈의 설치 조건에 따라 최적의 냉각 효과를 발휘할 수 있는 프리스윙 시스템 설계 조건에 대한 정보를 제공할 수 있다.

Carlo 등[6,7]은 Ansaldo Energia 사의 V94.3A 가스터빈에 대하여 무부하 조건과 외기 온도에 대한 탈설계점 분석을 수행하였으며 이에 따른 터빈 열효율 상관관계를 제시하였다. 또한 복합 화력 발전에서 특정 사이클을 사용하였을 경우 외기 온도 변화에 대한 탈설계점 분석을 통하여 가스터빈의 효율, 운전 유연성, 경제성을 모든 부품에서 확인할 수 있음을 밝혔다.

Schobeiri MT.[8]은 발전용 가스터빈 및 항공용 터빈에서 갖게 발생하는 시동 조건, 부하 운전과 정지 조건에서 탈설계점 연구의 필요성을 주장하면서 가스터빈 각 부품의 성능에 영향을 미치는 변수들을 제시하였다. 또한 탈설계점 조건에서 압축기 내부 유동의 회전 실속과 서어지(Surge) 발생을 극복하기 위한 스테이터(Stator)의 동적 각도 조절을 통하여 압축기의 서어지 발생 영역을 줄이고, 안정적인 작동 영역을 확보할 수 있음을 확인하였다.

본 연구에서는 가스터빈이 설치되는 다양한 환경을 고려하여 외기 온도와 터빈 부하 조건에 대한 탈설계점 연구를 수행하였다. 외기 온도 변화와 부하 조건에 따라 압축기를 통과하여 프리스윙 시스템으로 유입되는 공기의 전압(Total Pressure)과 전온도(Total Temperature)를 경계 조건으로 사용하였으며, 프리스윙 시스템의 입구 전압과 전온도 변화에 따른 출구에서 냉각 공기의 유량과 온도 변화를 측정하여 무차원수로 나타냈다. 이를 통하여 외기 온도와 터빈의 부하 변화에 따른 탈설계점에서 프리스윙 시스템의 유량계수와 단열계수를 분석하였다.

## II. 본 론

### 2.1 프리스윙 시스템

#### 2.1.1 유량계수 (Discharge coefficient, $C_D$ )

유량계수는 시스템을 흐르는 실제 유량과 주어진 시스템에 흐를 수 있는 이상적인 유량의 비율이다. 이상 유량은 유동이 등 엔트로피 과정으로 흐른다고 가정하였을 때, 시스템에 허용되는 가장 이상적인 유량을 나타낸다. 식 (1), (2) 에 측정 지점에 따른 유량계수를 나타냈다.

식 (1)은 프리스윙 노즐 출구, 식 (2)는 프리스윙 시스템 출구에서 측정한 유량계수를 의미한다. 유량계수

는 프리스윙 노즐의 목 면적, 입구 전압, 입구 전온도, 내부 유로의 질량 유량 등과 같은 다양한 조건에 의하여 영향을 받는다. 프리스윙 시스템의 리시버 홀 출구 정압(Static pressure)에 대한 입구 전압의 비율인 압력비가 커지고, 유량이 증가할수록 유량계수는 증가한다.

$$C_{DP} = \frac{\dot{m}_{real}}{\frac{A_p P_{1t}}{\sqrt{R T_{1t}}} \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa-1} \left\{ \left( \frac{P_{2s}}{P_{1t}} \right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left( \frac{P_{2s}}{P_{1t}} \right)^{1+\frac{1}{\kappa}} \right\}}} \quad (1)$$

$$C_D = \frac{\dot{m}_{real}}{\frac{A_p P_{1t}}{\sqrt{R T_{1t}}} \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa-1} \left\{ \left( \frac{P_{3s}}{P_{1t}} \right)^{\frac{2}{\kappa}} - \left( \frac{P_{3s}}{P_{1t}} \right)^{1+\frac{1}{\kappa}} \right\}}} \quad (2)$$

#### 2.1.2 단열계수 (Adiabatic effectiveness, $\theta$ )

프리스윙 시스템은 이차 유로를 흐르는 냉각 공기의 유동에너지 손실을 최소화하여 터빈에 공급하게 된다. 따라서 리시버 홀 출구 냉각 공기의 온도는 프리스윙 시스템의 성능을 평가하는 중요한 지표이다.

단열계수[9]는 비 회전부와 회전부의 전온도 차이를 무차원하여 나타낸 계수이며 로터의 회전 에너지에 대한 프리스윙 시스템의 엔탈피 변화량 비율을 나타내는 값이다. 단열계수가 양수이면 회전 에너지에 대한 프리스윙 노즐 엔탈피 변화량이 더 크다는 의미이며 이때 프리스윙 시스템을 통과한 작동 유체의 냉각이 이루어진다.

식 (3)에 엔탈피 변화량과 로터의 회전 에너지 비율로 이루어진 단열계수를 나타냈다. 또한 Fig. 1에 압력 및 온도 측정점을 나타냈다.

$$\theta = \frac{C_p |T_{3t,rel} - T_{1t}|}{\frac{1}{2} r^2 \omega^2} \quad (3)$$

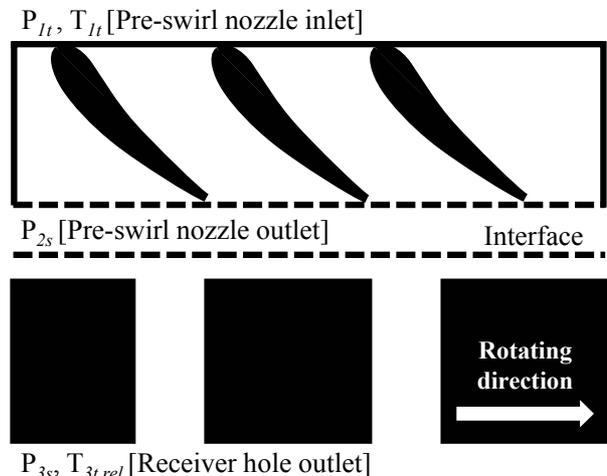


Fig. 1. Schematic diagram of the pre-swirl system

### 2.1.3 스윙비 (Swirl ratio, $\beta$ )

스윙비는 냉각 공기의 원주 방향 속도 성분( $v_\phi$ )과 회전 영역의 속도( $\omega r$ )의 비를 무차원하여 나타냈다.

$$\beta = \frac{v_\phi}{\omega r} \quad (4)$$

프리스윙 시스템 내부의 이상적인 유동에서 온도 변화량은 유동의 원주 방향 속도에 영향을 받는다. 이론적으로 유동의 원주 방향 속도 성분과 회전 속도가 같아져 스윙비가 1이 되는 경우, 이상적인 운전 상태라고 판단할 수 있다. 하지만 실제 프리스윙 시스템 내부에서 발생하는 유동에너지 손실을 고려하였을 때, 스윙비가 1보다 조금 큰 값을 가질 때 프리스윙 시스템은 최대 효율을 보인다.

## 2.2 탈설계점

가스터빈의 탈설계점 연구는 설계점을 벗어난 다양한 경계 조건에서 시스템의 유동 특성을 확인할 수 있다는 점에서 매우 중요한 연구이다. 현재까지 국내의 가스터빈 프리스윙 시스템에 관한 연구는 터빈이 안정적으로 동작하는 설계점을 기준으로 해당 경계 조건을 효과적으로 만족시킬 수 있는 방향에 대한 연구가 진행되었다. 프리스윙 노즐의 형상을 최적화하거나 캐비티, 리시버 홀에서 특정 형상에 따른 영향성을 분석하는 연구가 대표적이다[3,4].

하지만 터빈이 안정적인 동작 조건에 도달하기까지는 외부 환경에 따른 다양한 경계조건이 고려되어야 한다. 또한 가스터빈에서 외부로부터 압축기로 유입되는 공기의 온도 변화 또는 터빈의 부하 조건 변화와 같은 다양한 환경에서 유동의 특성에 대한 데이터를 추적하여 급격한 물성치 변화가 발생할 수 있는 시동 조건, 정지 조건에 대비할 수 있고, 새로운 시스템 설계 시 가이드라인의 역할을 할 수 있기 때문에 탈설계점 연구는 반드시 필요하다.

## 2.3 전산해석

### 2.3.1 형상

본 연구에서 사용된 프리스윙 시스템의 전산해석 영역은 Fig. 2와 같다. (주)두산중공업에서 제작중인 DGT-300H 가스터빈에 적용된 1단 프리스윙 시스템의 형상을 바탕으로 해석 영역을 제한하였다. 70개의 베인 형상 프리스윙 노즐과 68개의 리시버 홀이 축으로부터 동일한 반경에 위치하는 직접 분사(Direct-transfer) 프리스윙 시스템이 적용되었다. 유동에 회전 성분을 부여하는 프리스윙 노즐은 NACA 0010 익형을 바탕으로 해당 시스템에 최적화된 베인 형상을 적용하였다. 이차 유로 내부의 누설을 고려하여 캐비티 하단과 상단에 질량 유량 경계조건을 부여하였다. 프리스윙 시스템은 리시버 홀을 통과한 후 유로가 존재하지만, 리시버 홀

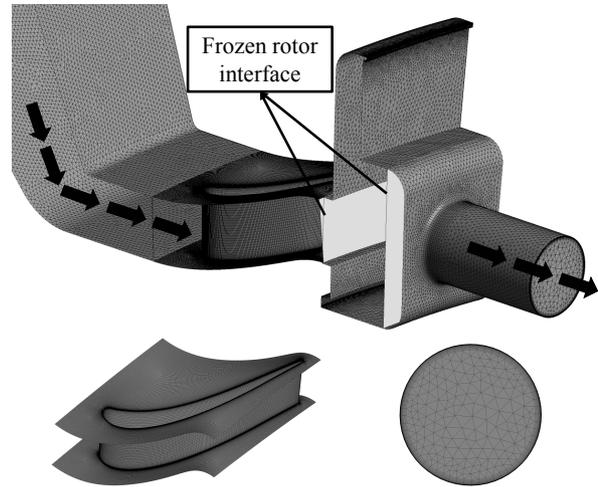


Fig. 2. Computational domain for numerical simulation

후방의 압력 영역의 존재 여부에 따른 해석 결과는 민감한 차이를 보이지 않는다. 따라서 계산 자원을 고려하여 리시버 홀 출구에 경계 조건을 부여하였다[10].

### 2.3.2 전산해석 기법

본 연구의 전산해석에는 Ansys CFX Ver. 19.3이 사용되었다. 지배방정식은 유동의 운동량에 대한 Navier-Stokes 방정식을 시간에 따라 평균화한 RANS(Reynolds-Averaged Navier-Stokes) 방정식을 사용하였다. RANS 방정식에서 발생하는 레이놀즈 응력 항을 근사하기 위한 모델로 SST(Shear Stress Transport)  $k-\omega$  난류 모델을 사용하였다[11]. SST  $k-\omega$  난류 모델은 벽면 근처 유동에는  $k-\omega$  모델을 사용하고, 벽면에서 먼 유동 영역에는  $k-\epsilon$  모델을 사용하여 각 모델이 가지는 단점을 보완한 모델이다. 결과값은 모든 종속 변수의 RMS (Root Mean Square) 값을 기준으로  $1 \times 10^{-4}$  이하에서 수렴하였다. 적용된 난류 모델을 고려하여 해석 영역 격자는 벽면 근처  $y^+$ 를 1 이하로 생성하였다. 프리스윙 노즐의 베인 형상은 BladeGen을 사용하여 설계하였으며, TurboGrid를 사용하여 육면체 격자를 생성하였다. 나머지 프리스윙 시스템 형상에는 사면체 격자를 생성하였다. 프리스윙 시스템 영역에 생성되는 격자수를 조절하며 격자 의존성 검사를 하였으며, 격자수의 변화에 따라 해석 결과가 변하지 않는 범위에서 격자를 생성하였다. 본 연구의 전산해석에 사용된 총 격자수는 노드수 7.1백만 개, 격자수 8.0백만 개다.

### 2.3.3 경계조건

프리스윙 시스템의 입구 조건은 전압과 전온도 조건을 사용하였으며, 리시버 홀 출구 조건은 정압 조건을 사용하였다. 입구에서 사용된 전압과 전온도는 실제 프리스윙 시스템 설계에 적용된 탈설계점을 (주)두산중공업으로부터 제공받아 사용하였다. 프리스윙 시스템의 냉각 공기는 압축기에서 추기하여 사용하기 때문

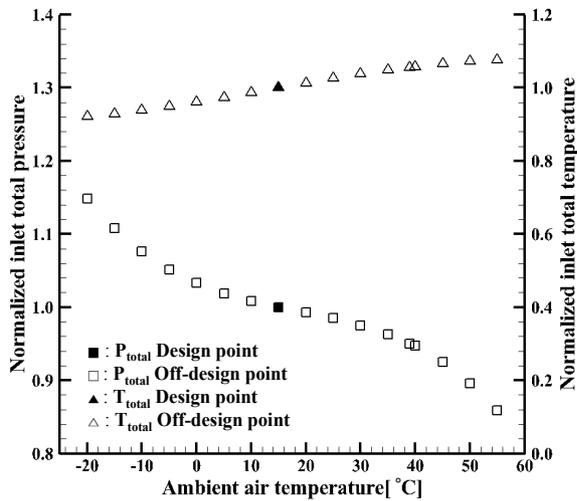


Fig. 3. Inlet boundary conditions of the pre-swirl system through ambient air temperature

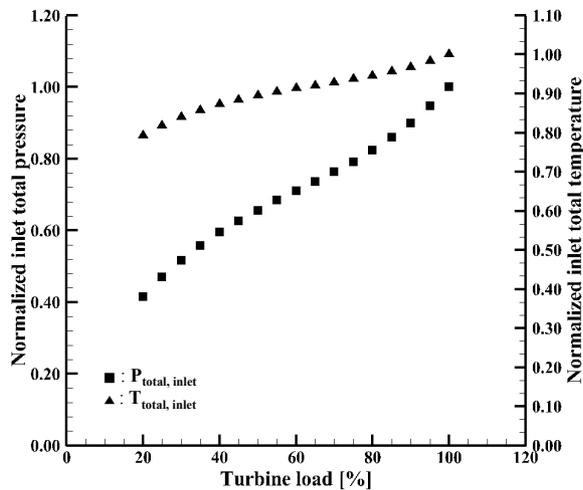


Fig. 4. Inlet boundary conditions of the pre-swirl system through turbine load

에, 분석을 위해서는 가스터빈의 외기 온도 변화와 터빈 부하 변화에 따른 압축기의 추기점에서 압력과 온도 정보가 요구된다. Fig. 3과 Fig. 4에 외기 온도 및 터빈 부하 조건에 따른 프리스윌 시스템의 입구 전압, 전온도를 나타냈다. 외기 온도 변화에 따른 입구 전압과 전온도 값은 15°C 상온에서 설계점의 경계 조건을 기준으로 정규화(Normalize) 하였고, 터빈 부하에 따른 입구 조건은 100% 최대 부하의 값을 기준으로 정규화하였다.

출구 정압 조건은 주어진 입구 전압에 대하여 스윌 비가 '1'에 근접한 값을 가지도록 적용하였다. 프리스윌 시스템 내부의 커플링(Coupling) 및 레비린스 실(Labyrinth Seal) 등에서 발생하는 누설은 질량 유량 조건을 적용하였다. 프리스윌 시스템의 구조상 내부에 정지 영역과 회전 영역이 공존하고 있으며, 이때의 인터페이스(Interface)를 처리하는 방법으로 프로즌 로터

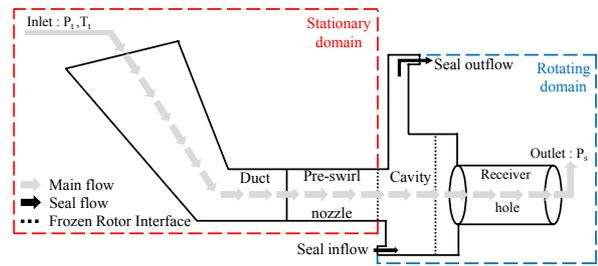


Fig. 5. Schematic diagram of the pre-swirl system for CFD domain

Table 1. Boundary conditions of the pre-swirl system

Pressure ratio		Inlet
1.21		Total temperature 716.2 [K]
Seal leakage		Wall
Inflow 0.389 [kg/s]	Outflow 0.204 [kg/s]	No-slip & adiabatic

(Frozen Rotor) 기법을 사용하였다. 프로즌 로터 기법은 비 회전 영역에서 회전 영역의 상대적인 위치를 고정하고 회전 영역의 좌표계에 회전 성분을 부여하여 정지 영역과 회전 영역이 공존하는 유로를 해석하는 기법이다. 일반적으로 프로즌 로터 기법을 사용할 때, 비 회전 영역과 회전 영역의 상대 위치(Pitch Ratio)가 해석 결과에 영향을 미친다. 하지만 프리스윌 시스템의 비 회전 영역과 회전 영역 사이에서 각기 다른 6개의 상대 위치에 따른 해석 결과를 비교하였을 때, 상대 위치에 따라 해석 결과는 ±0.2% 이내의 차이를 보였기 때문에 프리스윌 시스템에서 상대 위치에 따른 결과값은 큰 차이를 보이지 않는다고 판단하여 본 해석에서는 프리스윌 노즐과 캐비티 영역을 임의의 상대 위치에 고정한 뒤 해석을 수행하였다[12]. 작동 유체는 이상 기체를 바탕으로 물성치가 보정된 공기(Calibrated Ideal Gas)를 사용하였다[13]. 또한 원형 프리스윌 시스템을 효과적으로 모사하기 위하여 해석 영역은 유동의 진행 방향과 회전축을 중심으로 반복되는 면에 주기 조건(Periodic Condition)을 적용하였다. 벽 조건은 단열 조건(Adiabatic)과 정지 조건(No-slip)을 사용하였다. 전산해석에 사용된 입구 및 출구 벽면의 경계조건을 Fig. 5와 Table 1에 나타냈다.

### III. 결과 및 고찰

#### 3.1 결과 및 고찰

##### 3.1.1 격자 의존성 및 검증

CFD 해석을 수행하기에 앞서 생성된 격자에 대한

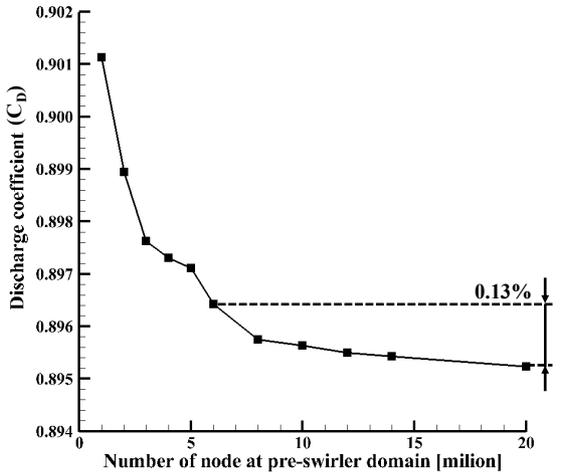


Fig. 6. Result of mesh independency analyze

격자 의존성을 검증하였다. 공간을 차분화하여 격자를 생성하고 이를 바탕으로 수치해석을 수행하는 CFD 기법의 특성상 해석 결과는 격자의 개수에 민감성을 가진다. 해석 결과가 격자 개수에 따라 크게 변하지 않는 범위를 찾기 위해 프리스윙 노즐 영역에서 격자 개수를 증가시키며 전산해석을 수행하였다. Fig. 6에 노드수에 따른 유량계수의 변화를 나타냈다. 해석 영역의 노드수가 6백만 개 이상부터 유량계수의 변화량이 적어지며, 노드수를 20백만 개 생성하였을 경우와 비교하여 해석 결과의 차이가 0.13% 이내로 수렴하였다. 따라서 계산 자원의 경제성을 위하여 프리스윙 영역의 격자는 노드수 6백만 개를 생성하여 해석을 수행하였다.

3.1.2 터빈 부하에 따른 탈설계점 분석

터빈의 부하 운전에 따라 변하는 경계 조건의 영향성을 고려하기 위하여 프리스윙 시스템의 입구와 출구 사이의 압력비를 일정하게 유지하며 고정된 스윙비에서 전산해석을 수행하였다. 터빈의 부하가 커질수록

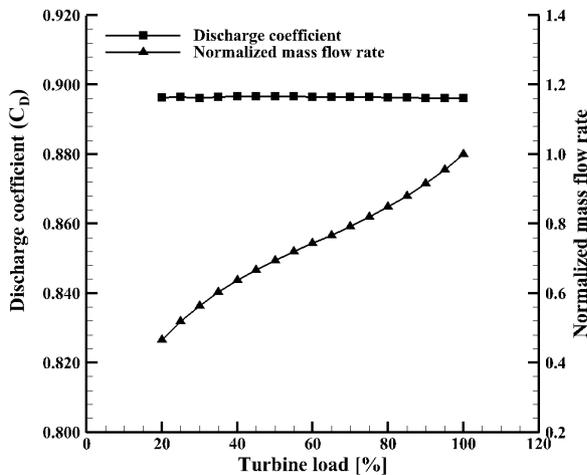


Fig. 7. Discharge coefficient and normalized mass flow rate through turbine load

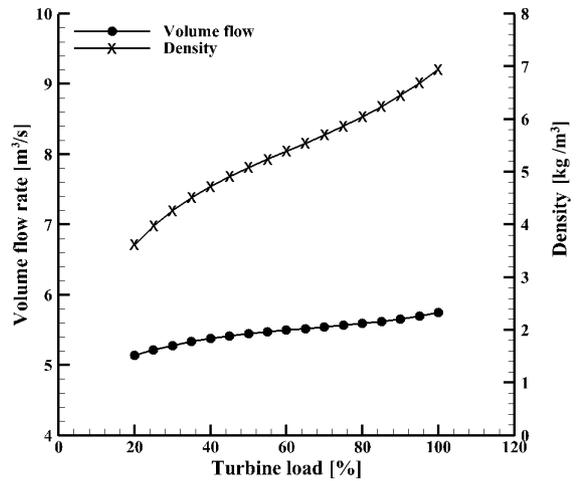


Fig. 8. Volume flow rate and density through turbine load

냉각 공기의 추기점과 프리스윙 시스템의 입구에서 전압과 전온도 모두 상승하였으며 프리스윙 시스템 내부 냉각 공기의 질량 유량도 함께 상승하였다. 하지만 프리스윙 시스템 출구에서 유량계수는 일정하였다. 이는 터빈 부하 변화에 따른 내부 유로의 질량 유량 변화량과 부여된 경계 조건에 대한 이상적인 질량 유량의 비율이 항상 일정함을 나타낸다. 이 결과를 통해 프리스윙 시스템의 냉각 성능을 파악하기 위해서는 유량계수와 온도 강하를 함께 고려해야 함을 알 수 있다. Fig. 7에 터빈 부하에 따른 프리스윙 시스템의 유량계수와 100% 부하조건을 기준으로 정규화된 질량 유량을 나타냈다. 일정한 유량계수에서 터빈 부하 상승에 따라 내부 냉각 공기의 밀도와 체적 유량은 상승하였다. 밀도는 온도와 압력의 함수이므로 부하 증가에 따른 프리스윙 시스템 입구 전압 상승에 의하여 냉각 공기의 밀도가 증가한다고 판단할 수 있다. 체적 유량은 단위 시간동안 흐르는 유체의 체적을 나타내기 때문에 체적 유량이 클수록 시스템 내에서 냉각 공기가 차지하는 체적이 커지게 되며 냉각 성능 또한 향상된다. 이러한 체적 유량은 밀도와 질량 유량의 비율로 나타낼 수 있으며, 터빈 부하 증가에 따라 질량 유량은 약 53.35% 상승하였고, 밀도는 약 47.88% 상승하였다. Fig. 8에 프리스윙 시스템 출구에서 체적 유량과 냉각 공기 밀도의 관계를 나타냈다. 밀도 변화량과 비교하여 질량 유량의 증가량이 더 크므로 터빈 부하 증가에 따라 체적 유량이 증가하였고, 이로 인해 프리스윙 시스템의 단열계수가 증가하였다. Fig. 9에 20% 터빈 부하와 100% 터빈 부하 조건에서 프리스윙 시스템 입구 대비 출구의 전온도 차이와 그에 따른 냉각 공기의 체적을 비교하였다. 터빈 부하가 증가함에 따라 냉각 공기의 체적이 증가하면서 프리스윙 시스템 출구에서 온도 강하가 더 많이 발생하였고, 단열계수는 30.46% 증가하였다. 캐비티 영역에서 냉각 공기는 100% 터빈 부하에서 비

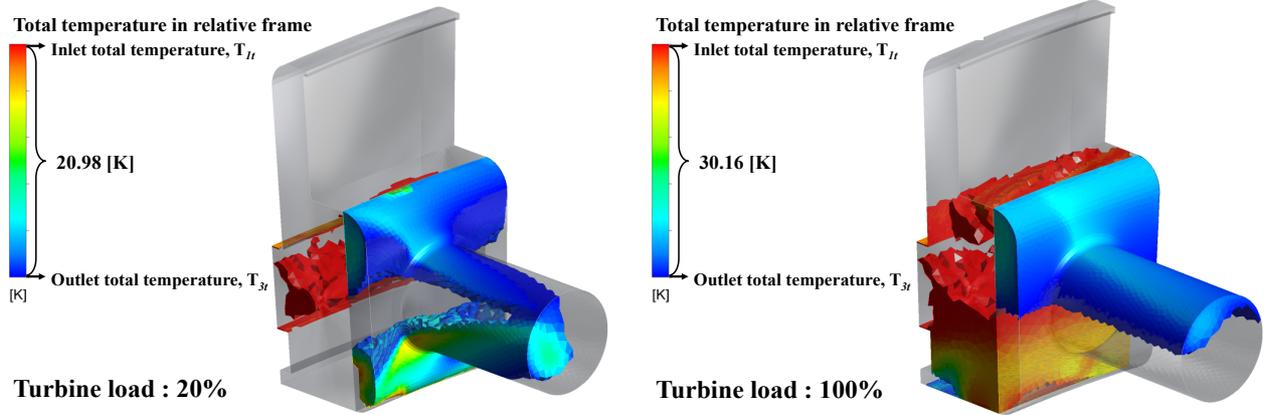


Fig. 9. Iso-volume of cooling air and cooling performance of the pre-swirl system through turbine load

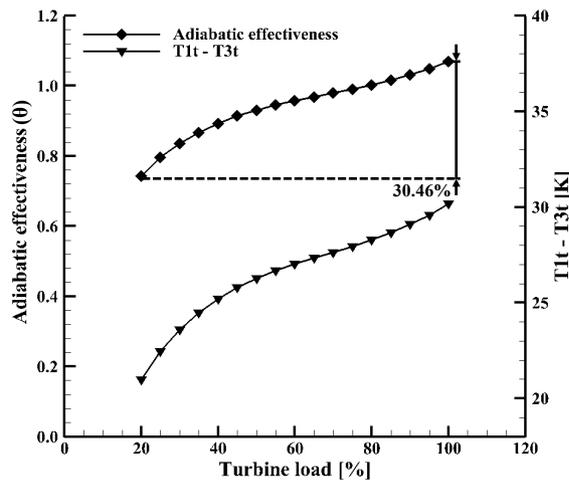


Fig. 10. Adiabatic effectiveness and difference of total temperature through turbine load

교적 고른 분포를 보인다. 따라서 20% 터빈 부하와 비교하였을 때, 캐비티 영역 내 국부 냉각 성능이 향상되어 전체 프리스윌 시스템의 냉각 성능 또한 향상되었다. DGT-300H 터빈 시스템의 설계점인 100% 부하 조건을 기준점으로 터빈 부하 감소에 따른 프리스윌 시스템의 탈설계점 분석을 진행한 결과 터빈 부하 감소에 의한 유량 계수 변화는 일정한 반면 냉각 공기의 유량 대비 냉각 성능은 감소하였다. 이는 이차 냉각 유로 설계 시 터빈 부하에 따른 냉각 성능 변화에 대한 고려가 필요함을 의미한다. 터빈 부하 증가에 따른 단열계수와 입구 대비 출구의 전온도 강하량을 Fig. 10에 나타냈다.

### 3.1.3 외기 온도 변화에 따른 탈설계점 분석

프리스윌 시스템의 입구와 출구의 압력비가 일정한 조건에서 외기 온도 변화에 따른 프리스윌 시스템 입구의 전압과 전온도를 경계 조건으로 탈설계점 분석을 수행하였다. 외기 온도는 상온의 설계점을 기준으로 가스터빈이 설치되는 환경을 고려하여  $-20^{\circ}\text{C} \sim 55^{\circ}\text{C}$

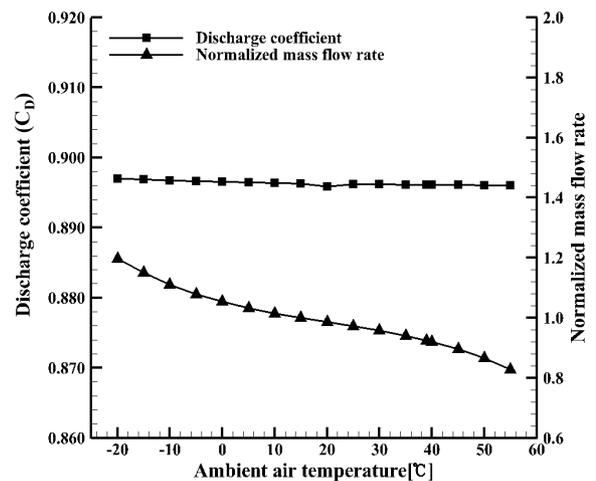


Fig. 11. Discharge coefficient and normalized mass flow rate through ambient air temperature

범위에서 해석을 수행하였다. 외기 온도 변화에 따른 유량계수와  $15^{\circ}\text{C}$ 의 상온을 기준으로 정규화된 질량 유량을 Fig. 11에 나타냈다. 앞서 터빈 부하 증가에 따른 결과와는 반대로 외기 온도가 증가하면서 프리스윌 시스템 입구 전압은 감소하였으며 내부 유로의 질량 유량 또한 감소하였다. 가스터빈의 외기 온도가 상승함에 따라 프리스윌 시스템 내부 유로에서 질량 유량은 30.87% 감소했지만, 유량계수의 변화는 최대 0.39% 이내로 일정하였다. 외기 온도 증가에 따라 감소하는 입구 전압에 의해 프리스윌 시스템에서 실제 유량은 감소하였다. 또한 냉각 공기의 압력과 온도의 변화로 프리스윌 시스템에서 형성될 수 있는 이상적인 유동의 질량 유량 역시 감소하였으며, 각 외기 온도에서 실제 유량과 이상유량의 비율은 일정하였다. 따라서 외기 온도에 다른 시스템의 냉각 성능을 비교하기 위해서 냉각 공기의 체적 유량을 분석하였다. Fig. 12에 외기 온도가  $-20^{\circ}\text{C}$ ,  $55^{\circ}\text{C}$  일 때, 냉각 공기의 체적과 프리스윌 시스템 입구 대비 출구의 온도 강하량을 각각 나타

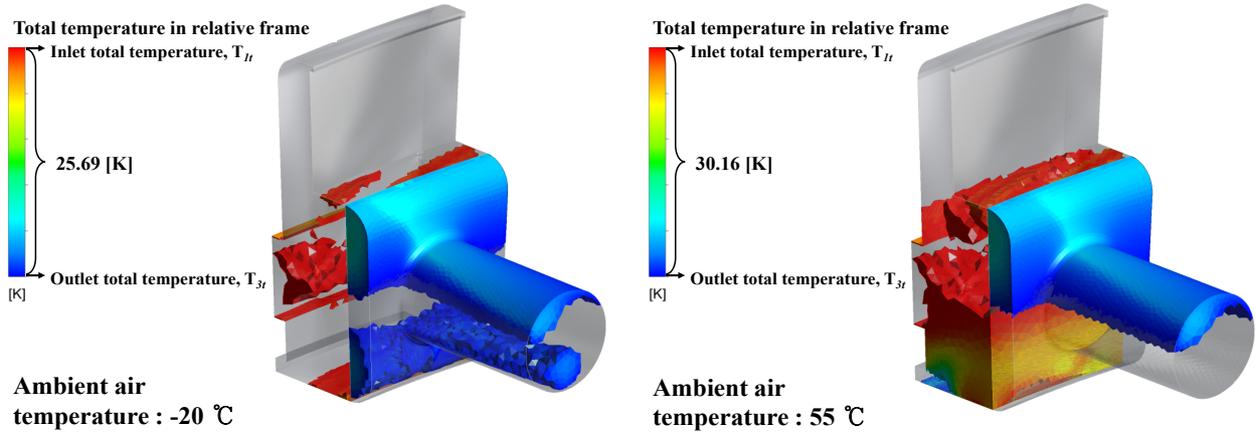


Fig. 12. Iso-volume of cooling air and cooling performance of the pre-swirl system through ambient air temperature

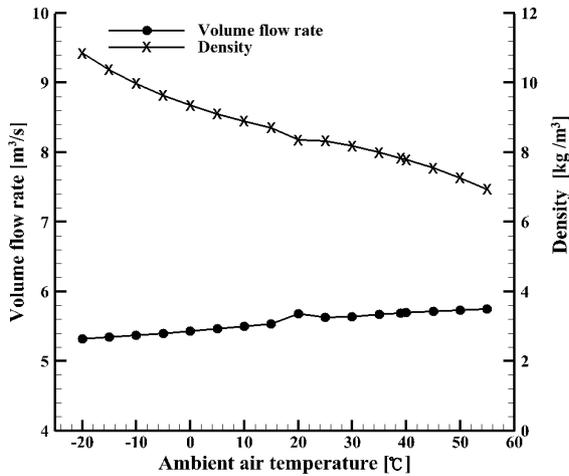


Fig. 13. Volume flow rate and density through ambient air temperature

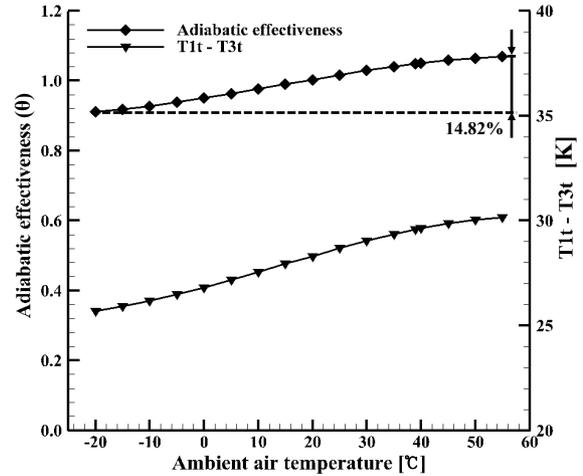


Fig. 14. Adiabatic effectiveness and difference of total temperature through ambient air temperature

냈다. 일정한 체적의 시스템에서 가스터빈 외기 온도가 55°C일 때, -20°C 외기 온도와 비교하여 냉각 공기의 체적이 증가하였으며 캐비티 영역 내에서 고른 분포를 보였다. 따라서 동일 면적에서 국부 냉각 성능은 55°C 외기 온도에서 향상되었고, 입구 대비 출구의 온도 강하량 또한 증가하였다. Fig. 13에 외기 온도에 따른 냉각공기의 체적 유량과 밀도를 나타냈다. 외기 온도가 증가하면서 냉각 공기의 밀도는 -20°C 외기 온도와 비교하였을 때, 36.00% 감소하였고, 질량 유량은 30.87% 감소하였다. 질량 유량의 감소량과 비교하여 밀도의 감소량이 더 크기 때문에 결과적으로 외기 온도 상승에 따라 냉각 공기의 체적 유량은 증가한다. 그 결과 단열계수가 -20°C 외기 온도와 비교하여 55°C 일 때, 14.82% 상승하였다. 외기 온도에 따른 탈설계점 분석은 DGT-300H 터빈 시스템의 설계점인 15°C 상온을 기준점으로 이차 유로 프리스윙 시스템에 국한하여 분석을 진행하였다. 외기 온도 증감에 따른 유량 계수의 변화는 일정하였지만 온도가 상승함에 따라 냉각 공기

의 유량 대비 냉각 성능은 향상되었다. 따라서 프리스윙 시스템 설계시 부하 조건과 함께 외부에서 냉각 유로로 유입되는 외기 온도 또한 고려해야함을 알 수 있다. Fig. 14에 가스터빈 외기 온도 증가에 따른 단열계수와 냉각 성능을 나타냈다.

#### IV. 결 론

본 연구는 전산해석 기법을 사용하여 가스터빈 이차 유로 프리스윙 시스템의 탈설계점 분석을 수행하였다. 가스터빈이 설치되는 환경의 외기 온도와 터빈 부하 변화에 따른 프리스윙 시스템의 내부 유동 특성을 터빈 전체 시스템과 독립적으로 분석하였으며, 입구 전압과 전온도를 경계 조건으로 부여하였다. 터빈 부하 증가에 따라 프리스윙 시스템의 출구에서 단열계수는 20% 부하 조건과 비교하여 100% 부하 조건에서 약 30.46% 증가하였고, 외기 온도 증가에 따라 -20°C 외

기 온도와 비교하여 55°C 외기 온도에서 단열계수는 약 14.82% 증가하였다. 본 연구에서는 단열계수로 표현되는 프리스윙 시스템의 냉각 성능을 체적 유량을 사용하여 분석하였다. 터빈 부하 증가에 따라 내부 유로에서 질량 유량과 밀도가 상승하였고, 그에 따라 체적 유량 또한 상승하게 되었다. 또한 단위 체적 당 냉각 공기의 체적이 늘어났기 때문에 프리스윙 시스템의 온도 강하량이 증가하면서 단열계수 또한 상승하였다. 반면, 외기 온도가 증가할 경우에는 입구 전압 감소에 의해 밀도와 질량 유량이 감소하였지만, 저온 대비 고온에서 질량 유량의 감소 비율보다 밀도의 감소 비율이 더 크기 때문에 결과적으로 캐비티와 리시버 홀에서 냉각 공기의 체적 유량은 증가하였다. 따라서 외기 온도가 증가하는 경우에 프리스윙 시스템 출구에서 온도 강하량과 단열계수는 증가하였다.

## 후 기

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국 에너지기술평가원(KEPTEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 2013101010170A).

## References

- 1) Khartchenko, N., and Kharchenko, V., *Advanced energy systems*, 2013.
- 2) Dittmann, M., Geis, T., Schramm, V., Kim, S., and Wittig, S., "Discharge Coefficients of a Preswirl System in Secondary Air Systems," *Journal of Turbomachinery*, Vol. 124, No. 1, 2001, pp. 119~124.
- 3) Javiya, U., Chew, J., Hills, N., and Scanlon, T., "A Comparative Study of Cascade Vanes and Drilled Nozzle Designs for Pre-Swirl," *Proceedings of the ASME Turbo Expo 2011*, June 6-10, 2011, pp. 913~920.
- 4) Bricaud, C., Geis, T., Dullenkopf, K., and Bauer, H.-J., "Measurement and analysis of aerodynamic and thermodynamic losses in pre-swirl system arrangements," *Proceedings of the ASME Turbo Expo 2007*, May 14-17, 2007, pp. 1115~1126.
- 5) Lee, J., Lee, H., Kim, D., and Cho, J., "Pre-swirl vane geometry optimization to improve discharge coefficient of gas turbine pre-swirl system," *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers, B*, Vol. 42, No. 2, 2018, pp. 101~110.
- 6) Carcasci, C., Costanzi, F., and Pacifici, B., "Performance analysis in off-design condition of gas turbine air-bottoming combined system," *Energy Procedia*, Vol. 45, 2014, pp. 1037~1046.
- 7) Carcasci, C., Facchini, B., Gori, S., Bozzi, L., and Traverso, S., "Heavy Duty Gas Turbine Simulation: Global Performances Estimation and Secondary Air System Modifications," *Proceedings of the ASME Turbo Expo 2006*, May 8-11, 2006, pp. 527~536.
- 8) Schobeiri, M.T., "Improving the Efficiency of Gas Turbines During Off-Design Operation by Adjusting the Turbine and Compressor Blade Stagger Angles," *Journal of Applied Mechanical Engineering*, Vol. 7, No. 1, 2018, pp. 1~10.
- 9) Karaby, H., Chen, J.-X., Pilbrow, R., Wilson, M., and Owen, J. M., "Flow in a "Cover-Plate" Preswirl Rotor - Stator System," *Journal of Turbomachinery*, Vol. 121, No. 1, 1999, pp. 160~166.
- 10) Benim, A. C., Brillert, D., and Cagan, M., "Computational Investigation of the Flow in Pre-Swirl Stator-Rotor Systems," *International Journal of Computational Methods*, Vol. 1, No. 2, 2004, pp. 329~343.
- 11) Javiya, U., Chew, J., Hills, N., Zhou, L., Wilson, M., and Lock, G., "CFD analysis of flow and heat transfer in a direct transfer pre-swirl system," *Proceedings of the ASME Turbo Expo 2010*, June 14-18, 2010, pp. 1167~1178.
- 12) Benim, A. C., Brillert, D., and Cagan, M., "Investigation into the Computational Analysis of Direct-Transfer Pre-swirl System for Gas Turbine Blade Cooling," *Proceedings of the ASME Turbo Expo 2004*, June 14-17, 2004, pp. 453~460.
- 13) Kim, J., Kang, Y., Kim, D., Lee, J., Cha, B., and Cho, J., "Optimization of a high pressure turbine blade tip cavity with conjugate heat transfer analysis," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 30, No. 12, 2016, pp. 5529~5538.