

# 1단 축류 가스터빈내 동익의 허브면에 장착된 경계층 펜스의 효과에 대한 수치 해석적 연구

윤덕규\* · 김재춘\*\* · 김대현\*\* · 이원석\*\* · 정진택\*\*\*†

## Numerical Analysis on Effects of the Boundary Layer Fence Equipped on the Hub of Rotor in the First Stage Axial Flow Gas Turbine

Deok Kyu Yoon\*, Jae Choon Kim\*\*, Dae Hyun Kim\*\*, Won Suk Lee\*\*,  
Jin Taek Chung\*\*\*†

*Key Words* : Axial flow gas turbine(축류 가스터빈), Rotor(동익), Boundary layer fence(경계층펜스), Secondary flow(이차유동), Hub(허브), Suction surface(흡입면)

### ABSTRACT

The objective of this study is to investigate the three-dimensional turbulence flow characteristics of a rotor passage of an one-stage axial flow gas turbine and to investigate the effects of a boundary layer fence installed on the hub endwall of the rotor passage. Secondary flows occurring within the rotor passage (e.g. horseshoe vortex, passage vortex, and cross flow) cause secondary loss and reduce turbine efficiency. To control these secondary flows, a boundary layer fence measuring half the height of the thickness of the inlet boundary layer was installed on the hub endwall of the rotor passage. This study was performed numerically. The results show that the wake and secondary flows generated by the stator reduced the rotor load to constrain the development of cross flow and secondary flow reinforced by the rotor passage. In addition, the secondary vortices occurring within the rotor passage were reduced by the rotation of the rotor. Although, the boundary layer fence induced additional vortices, giving rise to an additional loss of turbine, its presence was shown to reduce the total pressure loss when compared to effects of the case without fence regardless of the relative position of blades by enervating secondary vortices occurred within the rotor passage.

### 1. 서론

터빈의 고효율화를 위하여서는 온도의 상승과 아울러 내부에서 발생되어지는 공력손실을 최소화 하여야 한다. 터빈 익렬내에서는 선단과 후단에서 발생하는 복잡한 와류, 끝벽에서의 경계층의 발달과 익형의 곡

면에 따라 이차유동의 현상, 통로내의 통로와류와 말굽와류의 발생, 점성효과에 의한 익렬표면의 경계층, 정익과 동익의 상호작용으로 인한 비정상유동등과 같은 3차원 유동현상이 발생한다. 이러한 터빈 내부에서 발생하는 복잡한 3차원 난류유동은 터빈의 공력손실을 야기할 뿐만 아니라 고온의 연소가스와 터빈 구성요소간의 불균일한 열전달을 촉진시켜 열응력을 발생시킨다. 또한, 막냉각법을 사용할 때 냉각 유막을 표면으로부터 제거해 버리므로 막냉각 효과를 감소시켜 블레이드의 파손에 직접적인 원인이 된다. Figs. 1 과 2

\* 삼성광주전자

\*\* 고려대학교 대학원

\*\*\* 고려대학교 기계공학과

† 교신저자, E-mail : jchung@korea.ac.kr

는 한국남동발전소에서 장시간 운전되다 터빈 날개의 보수 수리를 위해 정비창에 들어온 다단으로 이루어진 터빈의 정익과 동익의 형상을 보여주고 있다. Fig. 1 은 케이싱에 장착되어 고정되어 있는 노즐 안내깃과 정익의 형상이고, Fig. 2 는 축에 장착되어 회전하는 동익의 형상인데 터빈 내부에서 발생하는 복잡한 3차원 난류유동, 열응력, 가진력 등에 의해서 블레이드가 파손된 모습을 볼 수 있다. 이러한 터빈 내부에서 발생하는 복잡한 3차원 난류유동의 억제제를 통한 공력 손실을 감소시키는 방안에는 경계층 펜스를 설치하거나 contoured endwall 설치를 통해 이차유동을 제어하는 방법이 있다. 얇은 두께의 펜스는 endwall contoured 보다 열부하에 대해 구조적으로 취약하며 이차 파손이 우려된다. 그러나 터빈 유로 내의 공력 손실은 압력면 말굽와류가 흡입면에 작용하면서 발생하는 이차유동과 관련이 있다. Chung 등<sup>(1),(2)</sup>은 두 개의 블레이드를 설치하여 Tuft grid, 유막법(Oil film method)등을 이용하여 익렬 통로 내에서 발생하는 3차원 유동 구조를 확인하였다. 그리고 터빈 익렬 통로 내에 펜스를 설치하여 이차유동의 성장을 억제시킴으로써 터빈 익렬 통로내의 냉각효과를 증가시킬 수 있다고 하였다. Kawai 등<sup>(3),(4)</sup>은 선형 캐스케이드의 끝벽에 서로 다른 크기의 펜스와 그 위치를 설정하여 하류에서의 전압과 속도 분포를 측정함으로써 최적의 펜스 크기와 위치를 결정하였다. 그 결과 최적의 펜스 높이와 위치는 입구 경계층 두께의 1/3 높이와 블레이드 사이의 1/2 피치 위치이며, 이로부터 이차손실을 20% 정도 감소시켰다고 하였다. 곽<sup>(5)</sup>은 정익과 동익의 상호작용으로 인한 비정상유동과 선단에서 발생하는 이차유동과 후류가 후단에 미치는 영향을 고려해주기 위해 2단으로 구성된 선형 캐스케이드를 설치하여 후단에 위치한 캐스케이드 내에 장착된 경계층 펜스의 효과에 대해 실험하였다. 그 결과 후단에 위치한 캐스케이드 내에서는 선단에 위치한 베인으로부터 발생된 후류와 통로와류의 유입으로 강한 횡단류가 발생하지 않아 경계층 펜스에 의한 이차유동 발생의 억제효과는 그리 크지 않았고, 펜스에 의한 와류의 발생으로 추가적인 손실이 발생하지만, 펜스를 설치한 경우 전체적인 손실은 블레이드의 상대적인 위치에 상관없이 감소한다고 하였다. 하지만 이 경우 선단에 캐스케이드를 대신한 일정한 곡률을 가진 베인을 설치하여 실험을 수행하였기 때문에 유동의 박리가 일어나면서 정확한 후류와 이차유동을 구현해 주지 못했다. 그리고 현재까지 경계층 펜스의

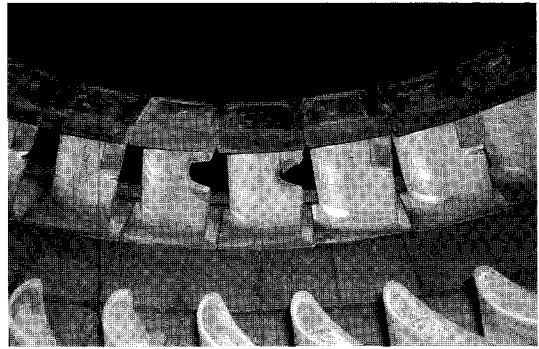


Fig. 1 The nozzle guide vane and stator in multi-stage axial flow gas turbine

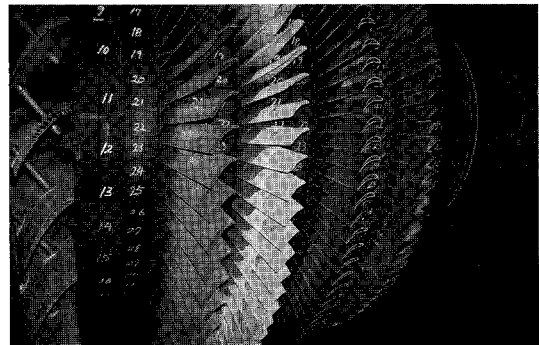


Fig. 2 The rotor in multi-stage axial flow gas turbine

효과에 대한 연구는 주로 캐스케이드 실험을 통해 이루어졌기 때문에 고온, 고압, 고 난류강도로 유입되는 실제 터빈의 운전 조건을 만족시킬 수 없었고 고속으로 회전하는 터빈에서 일어나는 원심력과 코리올리력을 고려해주시지 못했다. 따라서 본 연구에서는 실제 회전하는 1단 축류 가스터빈에서 동익의 통로내의 3차원 난류유동특성을 알아보고 동익의 통로내의 허브면 끝벽에 설치한 경계층펜스의 효과를 수치 해석적으로 연구하고자 한다.

## 2. 수치해석 방법

### 2.1 축류 가스터빈의 제원

본 연구에서는 과학기술처에서 시행한 '터보기계 설계 기술 개발에 관한 연구'<sup>(6)</sup>의 일환으로 국내 연구기관에 의해 설계된 '74kW 급 축류형 가스터빈'의 정익과 동익의 형상을 수치해석 모델로 사용하였다. Fig. 3 은 국내 연구기관에 의해 설계된 '74kW 급 축류형 가

스터빈'의 정익과 동익의 기본형상을 보여주고 있다. 본 수치해석에 사용된 축류형 가스터빈은 한단의 정익과 동익으로 이루어져 있으며 정익은 35개, 동익은 43개의 블레이드로 구성되어있으며 정익과 동익간의 간격은 동익 블레이드 높이의 20%이다. 그리고 본 연구에서는 격자구성과 계산의 편의성을 위해 동익과 케이싱 사이의 팁 간극(Tip clearance)은 없다고 가정하였다. 본 연구의 모델로 사용한 정익과 동익의 자세한 제원에 대해 Table 1에 나타내었다. Fig. 4는 동익의 허브면 위에 경계층 펜스가 장착된 하나의 동익 유

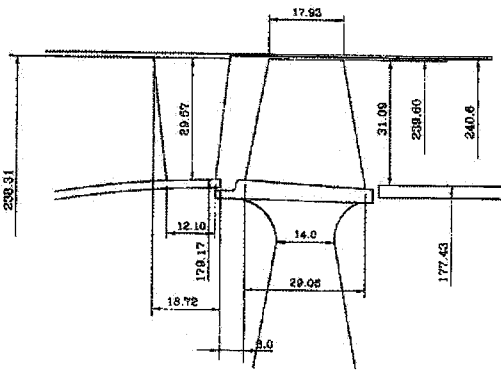


Fig. 3 Sketch of axial flow gas turbine(6)

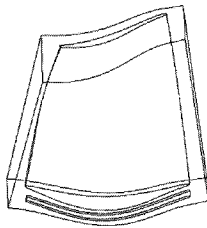


Fig. 4 The boundary layer fence equipped on the hub endwall of rotor

Table 1 Basic design parameters at the stator and rotor

	Stator	Rotor
Blade height (h)	29.57	31.09
Chord (c)	23.07	26.55
Pitch (s)	18.92	15.40
No. of Blade (N)	35	43
Tip Clearance (tc)	0	0
Tip Dia (Do)	238.31	239.6
Inner Dia (Di)	179.17	177.43
Aspect Ratio (h/c)	1.28	1.17
Pitch/chord ratio (s/c)	0.82	0.58

로에 대한형상을 보여주고 있다. 동익의 허브면 위에 장착된 경계층 펜스의 형상은 동익의 캠버라인과 같고, 길이는 동익의 코드 길이와 동일하며, 위치는 블레이드의 캠버라인과 이웃한 블레이드의 캠버라인의 피치방향 중간에 위치시켰다. 그리고 경계층 펜스의 높이는 동익 블레이드 높이의 3.4%로 입구 경계층 두께의 약 1/2배인 1mm이며 경계층 펜스의 두께는 0.6mm이다.

## 2.2 계산 격자 및 경계조건

1 단 축류 가스터빈에서 정익은 Turbo Grid-11을 사용하여 격자를 생성하였다. 그리고 동익은 펜스부근의 유동 특성 관찰을 용이하게 하기위해 ICEM-CFD를 사용하여 펜스부근의 격자 밀도를 높게 설정하였다. 격자의 독립성 검증을 위하여 4가지 격자 형태에 대해 전산해석을 수행하여 Fig. 5에서와 같이 펜스의 상단 부근인 스펜방향으로 4% 위치에서의 블레이드 표면 압력분포를 비교하였다. 격자 독립성 검증에 사용된 격자수는 Table 2에 나타내었다. 전산해석 결과, case 1에서 3까지는 오차율 1% 이내의 유사성이 나타났으나, case 4의 경우 출구 부근에서의 압력분포가 그 경향에서 벗어나고 있었다. 이에 본 연구에서는 case 3에서의 격자수를 적용하여, 총 격자수는 정익의 입구에 설치한 inblock에 3만개, 정익에 10만개, 동익

Table 2 The information of Grid

	Stator	Rotor
Case 1	200,000	150,000
Case 2	150,000	115,000
Case 3	100,000	77,000
Case 4	50,000	50,000

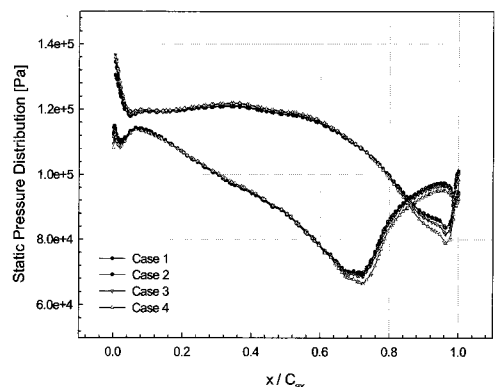


Fig. 5 Pressure distribution around the rotor blade at 0.4% span

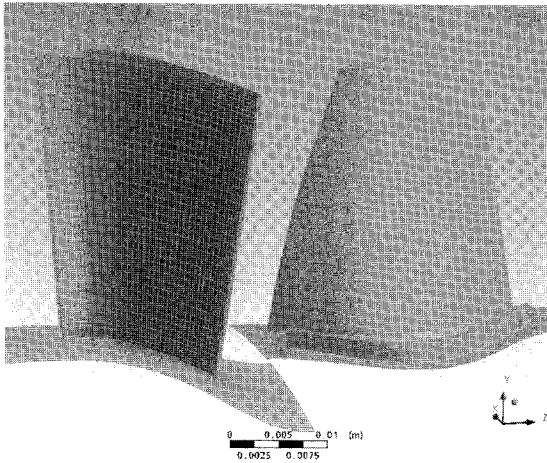


Fig. 6 Computational grid of an axial flow gas turbine with fence in a rotor passage

Table 3 Operating condition<sup>(6)</sup>

CONTENTS	SPECIFICATIONS
Stages	1
RPM	30,000
Mass Flow	1.911 Kg/sec
Turbine Inlet Temperature	1092.9K
Inlet Total Pressure	190.5435 kPa
Boundary layer thickness( $\delta$ )	2.1 mm
Turbulence intensity	5 %

에 77 만개, 동익의 출구에 설치한 outblock 에 3 만개로 총 93 만개이다. Fig. 6 에 수치해석에 사용된 계산 격자를 나타내었다. 해석을 위한 solver 는 상용프로그램인 ANSYS CFX-11 을 사용하였다. 수송 방정식에서 대류항의 이산화 기법은 High Resolution Scheme 을 사용하였으며, 난류방정식은  $k-\omega$  모델에 기초한 SST 난류모델을 사용하였다. 그리고 유동에 관해 정상적이고 주기적이라는 가정을 통해 하나의 유로만을 모델링하여 해석하였다. 또한 전산해석에 사용된 Wall-Function 은 식 (1), (2), (3) 의 관계식을 이용한 Launder 와 Spalding<sup>(7)</sup> 의 method 를 사용하였다.

$$u^+ = \frac{U_t}{u_\tau} = \frac{1}{\kappa} \ln(y^+) + C \quad (1)$$

$$y^+ = \frac{\rho \Delta y u_\tau}{\mu} \quad (2)$$

$$u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (3)$$

$u_\tau$  는 마찰 속도를 의미하고  $U_t$  는 벽으로부터  $\Delta y$  만큼 떨어져 있는 벽에서의 tangential 방향 속도이다.  $y^+$  는 벽으로부터의 무차원 거리를 의미한다.  $\tau_w$  은 벽면 전단응력이다.  $\kappa$  는 Von Karman 상수이며 C는 벽 거칠기에 대한 log layer 상수이다. 본 연구에 사용된  $y^+$  값은 블레이드 표면과 펜스 표면에서 2 이하이다. 정지계와 회전계사이의 인접면(interface) 처리기법으로는, 정익 날개의 통로(passage)에서 자오방향의 변화와 원주방향의 변화가 인터페이스를 통해 보존되어 정익과 동익의 특정한 상대 위치에 대해서 선단에 위치한 정익에서 발생하는 후류(wake)와 순환흐름(swirl) 등의 영향이 후단에 위치한 동익에 그대로 전파되는 Frozen rotor 기법을 사용하여 계산하였다. 본 연구에서 경계조건은 입구에 전압력과 전온도를 주었고, 출구에는 질량유량을 주었다. 동익의 회전 속도는 30,000 rpm 이며 입구 난류강도는 자유 유동에 의한 난류강도에 대한 선형 캐스케이드 실험<sup>(8)</sup>에서 사용된 난류강도 중 가장 큰 5%로 지정하였다. 자세한 운전조건에 대한 데이터는 Table 3에 표기하였다.

### 3. 수치해석 결과 및 고찰

#### 3.1 블레이드의 상대적 위치 변화

본 연구에서는 정익과 동익의 상대적 위치변화에 따른 동익내 유동특성과 동익의 허브면 위에 설치된 경계층 펜스의 이차유동 억제효과의 여부를 알아보기 위해 동익을 피치의 1/4 씩 회전방향으로 회전시키면서 4 가지 경우의 특정한 정익과 동익의 상대 위치에 대하여 계산을 수행하였다. Fig. 7 에 본 연구에서 계산한 4 가지 경우의 정익과 동익의 상대적 위치변화를 나타내었다.

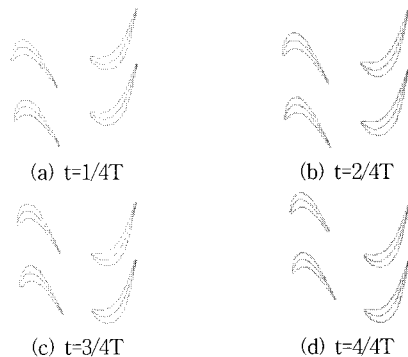
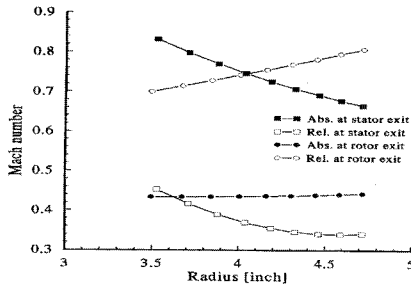


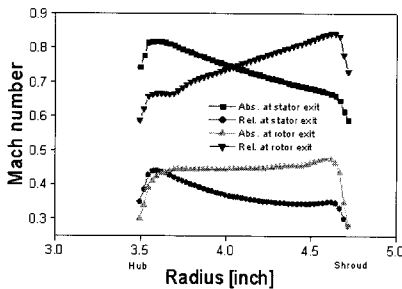
Fig. 7 Relative positions of stator and rotor

### 3.2 해석결과의 검증

본 연구에서는 계산결과의 타당성을 검증하기 위해 과학기술처에서 시행한 ‘터보기계 설계 기술 개발에 관한 연구’<sup>(6)</sup>의 일환으로 국내 연구기관에 의해 유선곡률법으로 설계 되어진 터빈의 설계데이터와 본 연구의 계산결과를 비교하였다. Fig. 8의 (a)는 유선곡률법에 의해 얻어진 변경방향의 마하수의 변화를 보여 주고 있는데 전체적으로 최고 마하수가 0.85 정도의 값을 보여 주고 있다<sup>(6)</sup>. 그리고 정익의 출구에서 허브측에 높은 마하수를 나타내는 것은 주유동방향 절대속도가 슈라우드 부근에 비해 크기 때문이다. 정익의 허브부근에서 절대속도가 증가하는 이유는 단순히 정익의 출구각이 크기 때문만이 아니라 허브부근의 유동면적이 슈라우드에 비해 작기 때문이다. Fig. 8의 (b)는 본 연구에서의 계산 결과를 보여주고 있다. 끝벽에서의 마찰과 익렬내에서 발생하는 이차유동으로 인해 허브면과 슈라우드면 근처에서는 결과가 서로 다르지만 끝벽을 제외한 영역에서는 전체적으로 마하수의 변화가 상당히 일치함을 알 수 있다. 따라서 본 연구의 계산결과가 타당성이 있는 것으로 판단된다.



(a) Design data<sup>(6)</sup>



(b) Calculation (t=4/4T)

Fig. 8 Comparison of Mach number along the radial direction with the design data by streamline curvature method

### 3.3 공력특성

본 연구에서는 동익의 통로내부의 공력특성을 고찰하고, 도시하기 위하여 Fig. 9와 같이 동익의 통로내부를 4등분하여 축 방향에 수직한 5개의 평면을 설정하였다. 각 평면의 번호는 허브면을 기준으로 축 방향으로  $x/C_{ax} = -0.05, 0.225, 0.5, 0.775, 1.05$ 인 평면을 각각 평면 1, 평면 2, 평면 3, 평면 4, 평면 5라고 명명하였다. 그리고 각각의 평면에 대한 유선방향 와도를 도시하여 이차유동의 분포를 고찰하였고, 전압손실계수를 도시하여 손실의 발생과정을 고찰하였으며, 각각의 경우에 대한 통로 하류에서의 전압력손실을 비교하여 경계층 펜스의 설치효과를 정량적으로 비교하였다.

#### 3.3.1 유선방향와도 (Streamwise Vorticity)

경계층 펜스를 설치하였을 때와 설치하지 않았을 때의 이차유동성분을 비교하기 위하여 유선방향의 와도를 나타내었다. 유선방향 와도는 통로와류와 펜스와류 등의 와류의 생성과 와류의 회전방향과 회전강도를 나타낼 수 있기 때문에 통로 내의 유동을 분석하는데 유용한 자료가 될 수 있다. 유선방향 와도를 구하는 식은 식 (4)과 같으며 도시된 유선방향 와도는  $\Omega \times 10^{-3}$  값을 나타내었다.

$$\omega = (\nabla \times V) \cdot V \tag{4}$$

$$\omega = \frac{\sum_i \sum_j (|\omega| u d A)_{ij}}{\sum_i \sum_j (u d A)_{ij}} \tag{5}$$

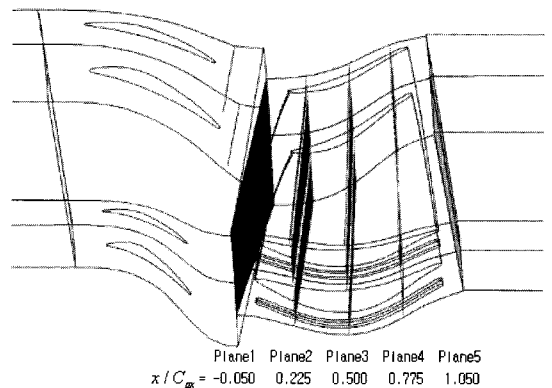


Fig. 9 Definition of the planes for view

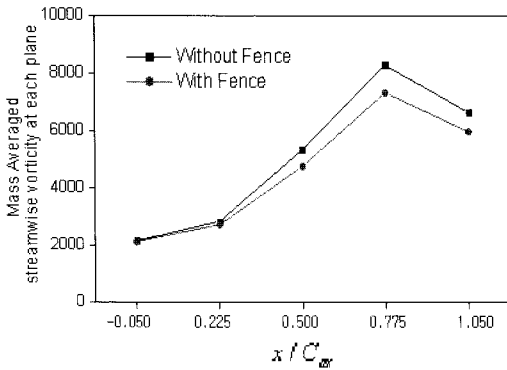


Fig. 10 Mass averaged streamwise vorticity at each plane (t=4/4T)

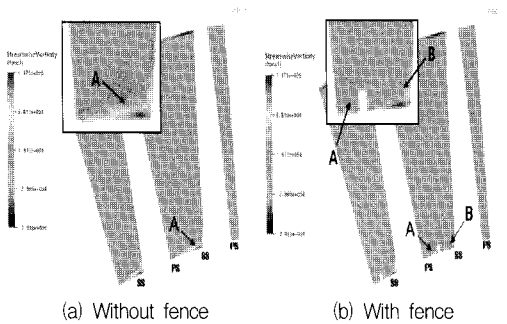


Fig. 11 Streamwise vorticity distribution at plane3 (t=4/4T)

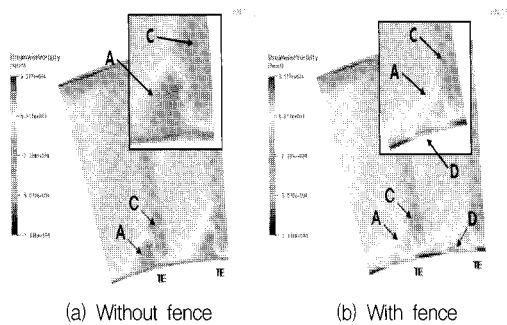


Fig. 12 Streamwise vorticity distribution at plane5 (t=4/4T)

경계층 펜스의 설치에 의한 이차유동 감소의 효과를 유선방향 와도의 질량평균으로 비교하려면 와류의 방향성 때문에 식 (5)와 같이 유선방향 와도의 절대값을 질량평균한 값으로 비교하여야 한다. Fig. 10은 펜스를 설치했을 때와 펜스를 설치하지 않았을 경우의 각 평면에서 유선방향 와도의 절대값의 질량평균

한 값을 비교한 그래프이다. 평면 1에서는 동익의 통로 앞전이므로 경계층 펜스의 유무에 관계없이 유선방향 와도의 절대값의 질량평균한 값이 같았고 평면 2에서는 선단에 위치한 정익의 통로에서 발생된 통로 와류가 후단에 위치한 동익의 통로내로 유입되면서 회전방향이 반대인 동익의 통로내에서 발달하는 통로 와류의 성장을 억제시켜 경계층 펜스의 효과가 크게 나타나지 않았다. 하지만, 동익의 통로 하류로 갈수록 선단에서 발생된 통로와류의 영향은 사라지고 경계층 펜스가 동익 내에서 발달하는 통로와류의 발달을 억제시켜 주어서 유선방향 와도의 절대값의 질량평균한 값이 감소하였으며, 이는 경계층 펜스의 설치가 이차유동의 발달을 억제시키는 효과를 가져다줄을 보여주고 있다. 반면, 통로의 출구영역인 평면 5에서는 통로를 벗어난 유동의 급격한 확산으로 와도의 질량평균값이 두 가지 경우에서 모두 작아지는 것을 볼 수 있다. Fig. 11과 Fig. 12는 동익의 상대위치가  $t=4/4T$ 일 때의 평면 3과 평면 5에서의 유선방향 와도를 나타낸 그림이다. 각 평면은 동익의 뒷전에서 관찰한 유선방향와도의 분포를 나타내고 있다. Fig. 11과 Fig. 12에 나타난 동익은 시계 반대방향으로 고속회전 (30,000 rpm)을 하고 있다. 각 평면에서 나타난 유선방향의 와도가 양의 값이면 시계 반대방향으로의 와도를 나타내고 음의 값이면 시계방향으로 회전하는 와도를 나타낸다. Fig. 11 (a)의 평면 3에서는 동익의 앞전에서 발생한 압력면 부근의 말굽와류 성분 A가 형압력 구배에 의해 흡입면으로 이동하면서 회전강도가 강해진다. Fig. 11 (b)의 경우, 압력면 말굽와류 성분 A가 경계층 펜스의 차단효과 때문에 펜스의 부근에서 자리 잡고 있는 것을 관찰할 수 있다. 그리고 펜스 앞전에서 생긴 말굽와류 성분 B가 펜스와 흡입면이 이루는 채널 안에서 발달하면서 흡입면으로 이동하는 것을 관찰할 수 있다. Fig. 12 (a)의 평면 5에서는 동익의 후류 와류 C에 의해 통로와류의 위에 반대 방향의 회전 성분이 나타나고 있는 것을 볼 수 있다. Fig. 12 (b)의 경우, 통로와류 A에 의한 와도의 강도가 약해졌으나, 펜스와류 D에 의한 음의 값을 가지는 와도가 나타났다. 하지만, 펜스가 없는 경우에 비하여 전체적으로 유선방향 와도의 크기는 감소되었다.

### 3.3.2 전압손실계수 분포

축류 가스터빈에서 발생하는 전압손실은 블레이드 표면의 경계층의 성장, 표면에서의 마찰과 폐쇄효과

(blockage effect)에 의한 형상손실(profile loss), 두께를 갖는 뒷전과 뒷전에서 발생한 후류에 의한 뒷전손실(trailing edge loss), 익형의 압력면과 흡입면에서의 압력차에 따라 압력면에서 흡입면으로의 유동과 익형을 따라 흐름이 휘어지게 됨에 따라 와류가 발생하여 생기는 이차손실(secondary loss), 끝벽의 경계층과 블레이드 사이의 마찰에 의한 annulus loss, 터빈에서 회전하는 회전익과 내 벽면(Casing)과의 간극에서 유동 누설에 의해 발생하는 간극손실(leakage loss)등으로 구분할 수 있다.<sup>(8)</sup> 본 연구에서는 동익과 케이싱 사이의 간극을 배제하였으므로 간극손실은 고려하지 않았다. 전압손실은 식 (6)과 같이 입구 유동의 전압  $P_{t0}$  과 계산점에서의 전압  $P_t$ 의 차이를 자유 유동 속도 수두로 무차원화하여 계산하였다.

$$C_{p_t} = \frac{P_{t0} - P_t}{\frac{1}{2} \rho_{\infty} U_{\infty}^2} \quad (6)$$

$$\overline{\overline{C_{p_t}}} = \frac{\sum_i \sum_j (C_{p_t} u dA)_{ij}}{\sum_i \sum_j (u dA)_{ij}} \quad (7)$$

Fig. 13은 각 평면에 대한 질량평균 전압손실계수를 나타낸 그래프이다. 질량평균 전압손실계수는 식 (7)의 계산식을 이용하여 구하였다. Fig. 13을 보면, 평면 1에서는 동익의 통로 앞전이므로 경계층 펜스의 유무에 관계없이 질량평균 전압손실계수의 값이 같았고, 평면 2에서는 정익의 후류로 인해 동익내 통로와류의 발달

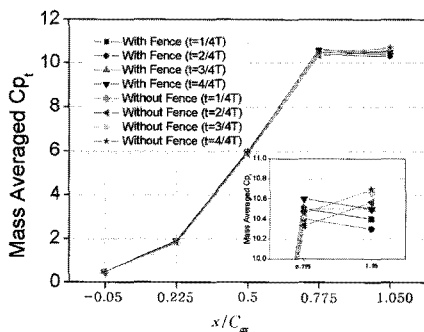


Fig. 13 Mass averaged total pressure loss coefficient along the rotor position at each plane

이 억제되어 경계층 펜스의 효과가 크지 않았다. 하지만 평면 3, 평면 4, 평면 5로 가면서 경계층 펜스가 동익 내에서 발달하는 통로와류의 성장을 억제 시켜 주어서 질량평균 전압손실 값이 다소 감소하였다. 비축거리 0.775에서 펜스가 없는 경우에 loss가 더 낮은 이유는 펜스 디자인상에 원인이 있을 것으로 판단된다. 하지만 비축거리 -0.05, 0.225, 0.5, 1.05에서 모두 펜스가 있는 경우 loss가 더 낮은 것으로 결과를 띄기 때문에, 펜스가 있는 경우가 전압손실감소에 도움을 준다고 판단된다. 동익의 회전위치에 따라서 전압손실 값의 크기가 조금씩 달라지는 것으로 나왔지만 각 경우마다 펜스를 설치한 경우가 펜스를 설치하지 않은 경우보다 전압손실이 감소하였음을 확인 할 수 있다.

### 3.3.3 블레이드의 상대적 위치 변화에 따른 공력특성

Table 4는 통로의 하류인 평면 5에서 펜스를 설치한 경우와 하지 않은 경우의 블레이드의 상대적 위치 변화에 따른 질량평균 전압손실과 질량평균 전압손실의 감소율을 비교한 표이다. 질량평균 전압손실의 감소율은 펜스를 설치한 경우와 펜스를 설치하지 않았을 때의 전압손실의 차이를 백분율로 나타낸 것으로 식 (8)과 같이 계산된다. 평면 5에서 상대위치  $t=1/4T$ 는 펜스를 설치한 경우가 펜스를 설치하지 않은 경우보다 효율이 2.34% 좋아졌으며, 상대위치  $t=2/4T$ 에서는 펜스를 설치한 경우가 2.46%로 가장 높은 효율을 나타내었다. 상대위치  $t=3/4T$ 에서는 1.41%로 가장 낮은 효율을 보였으며,  $t=4/4T$ 에서는 1.87% 공력손실에 대한 효율이 향상됐다. 블레이드의 상대위치 변화에 따른 질량평균 전압손실의 감소율을 비교한 결과 블레이드의 상대적 위치변화에 상관없이 모든 주기에서 경계층 펜스를 설치했을 때 전압손실이 감소하였음을 알 수 있다.

$$\eta_f = \frac{\overline{\overline{C_{p_t}}}_{without\ fence} - \overline{\overline{C_{p_t}}}_{with\ fence}}{\overline{\overline{C_{p_t}}}_{without\ fence}} \times 100(\%) \quad (8)$$

Table. 4 Mass averaged total pressure loss coefficient at plane5

	t=1/4T		t=2/4T		t=3/4T		t=4/4T	
	no fence	with fence	no fence	with fence	no fence	with fence	no fence	with fence
$\overline{\overline{C_{p_t}}}$	10.67	10.42	10.57	10.31	10.67	10.52	10.70	10.5
$\eta_f$	2.34		2.46		1.41		1.87	

### 3.3.4 회전에 의한 효과

가스터빈시스템에서 압축기와 연소기를 통과한 고온 고압의 가스는 터빈부로 유입되어 회전력을 얻게 되는데 이렇게 얻어진 회전력에 따른 동익내 유동특성의 변화를 고찰하기 위하여 회전이 없는 경우의 결과와 비교하였다. Fig. 14는 터빈에서 30,000 rpm의 회전력을 얻는 경우와 회전이 없는 경우의 질량평균 유선방향 와도의 크기를 비교한 것이다. 동익이 회전하는 경우, 유선방향와도가 상쇄되어 유선방향와도의 크기가 감소하였다. 와도의 Fig. 14에서의 legend가 0에서 20,000 사이의 값을 가지는 이유는 와도의 절대값을 질량평균하여 계산하였기 때문이다. 와도의 절대값을 이용하여 계산한 이유는, 경계층 펜스의 설치에 의한 이차유동 감소의 효과를 유선방향와도의 질량 평균으로 비교하려면 와도의 방향성 때문에 유선방향와도의 절대값을 질량평균한 값으로 비교하여야 하기 때문이다.

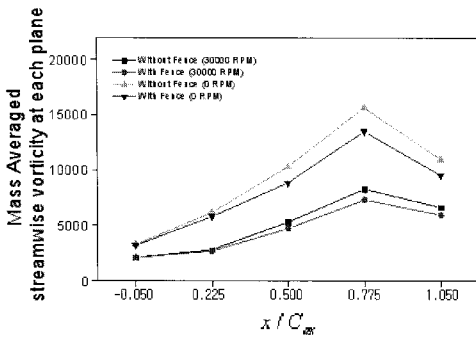


Fig. 14 Mass averaged streamwise vorticity at each plane (t=4/4T, 30000rpm, 0rpm)

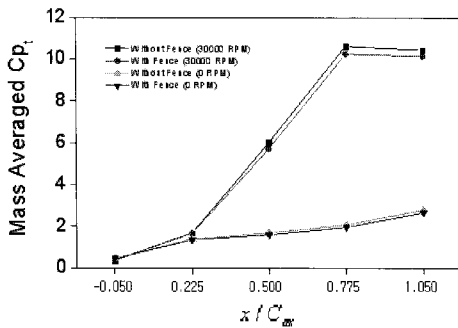


Fig. 15 Mass averaged total pressure loss coefficient at each plane (t=4/4T, 30000rpm, 0rpm)

Fig. 15는 동익의 회전 유무에 따른 질량평균 전압 손실계수를 비교한 것이다. 동익이 회전하는 경우, 동익유로내에서 발생한 이차유동은 회전력으로 상쇄되어 회전하지 않는 경우에 비해 이차유동의 강도의 크기가 더 줄어들기 때문이다. 이와 같이 동익의 회전 유무에 따른 유선방향 와도, 질량평균 전압손실계수를 비교한 결과, 동익의 회전은 이차유동의 크기를 감소시켜, 회전하는 동익의 허브면에 장착한 경계층 펜스의 효과는 크게 나타나지 않게 하였다.

## 4. 결론

고속으로 회전하는 실제 가스터빈의 운전조건에서, 정익과 동익으로 구성된 산업용 1단 축류 가스터빈내 동익의 허브면에 설치한 경계층 펜스의 효과를 연구한 결과, 정익에서 발생된 후류와 이차유동이 동익의 통로내로 유입되면서 동익내에 강한 횡단류가 발생하지 않아 경계층 펜스에 의한 이차 유동 발생의 억제 효과가 그리 크지 않았고, 또 동익의 회전에 의하여 이차유동의 크기가 감소되어 동익의 허브면에 설치한 경계층 펜스의 효과는 작게 나타났다. 동익에서의 경계층 펜스의 효과가 작은 이유는 회전에 의한 이차유동이 틈쪽으로 치우쳐서 발생하기 때문이다. 이로 인해 경계층 펜스의 효과는 동익보다는 정익에서 더 클 것으로 판단된다. 하지만, 두 가지의 경우 모두에서 경계층 펜스를 설치하였을 때 블레이드의 상대적인 위치 변화에 관계없이 공력 손실이 감소함을 알 수 있었다.

## 후기

본 연구는 고려대학교 교내특별연구비에 의하여 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) Chung, J. T., Simon, T. W. and Buddhavarapu, T., 1991, "Three Dimensional Flow Near the Blade/Endwall Junction of a Gas Turbine: Application of a Boundary Layer Fence," ASME paper, No. 91-GT-45.
- (2) Chung, J. T. and Simon, T. W., 1993, "Effectiveness of the Gas Turbine Endwall Fences in Secondary



- Flow Control at Elevated Freestream Turbulence Levels," ASME paper 93-GT-51.
- (3) Tatsuo KAWAI, Shuji SHINOKI, and Tsutomu ADACHI, 1990, "Visualization Study of Three-Dimensional Flows in a Turbine Cascade Endwall Region," JSME International Journal, Series II, Vol. 33, No. 2, pp. 256~264.
- (4) Tatsuo Kawai, Tsutomu ADACHI and Shuji SHINOKI, "Secondary Flow Control and Loss Reduction in a Turbine Cascade Using Endwall Fences", JSME International Journal, Series II, Vol.32, No.3, pp. 375~387.
- (5) 광재수, 정진택, 1998, "2단 캐스케이드 내에 장착된 경계층 펜스의 효과에 대한 실험적 연구," 대한기계학회 춘계학술대회 논문집 B, pp. 745~750.
- (6) 오군섭, 김수용, 조수용, 윤의수, 이상록, 백재현, 박준영, 김현일, 우건중, 1996, "터보기계 설계 기술 개발에 관한 연구," 과학기술처 연구보고서, UCN 031-380M, pp. 179~302.
- (7) Launder, B.E. and Spalding, D.B., "The numerical computation of turbulent flows," Comp Meth Appl Mech Eng, 3:269-289, 1974.
- (8) David Japikse and Nicholas C. Baines, 1994, "Introduction to Turbomachinery", Concepts ETI, INC. and Oxford University Press, pp. 6~39.
- (9) 김성민, 김운제, 조형희, 2001, "자유유동 난류강도와 분사미가 터빈 블레이드 선단 막냉각 특성에 미치는 영향," 대한기계학회 춘추학술대회 제2권 제2호, 1, pp. 746~751.