

끝벽의 형상이 터빈 노즐안내깃 캐스케이드내 3차원 유동에 미치는 영향에 관한 연구

윤원남* · 정진택**

Experimental Study on Effect of the Contoured Endwall on the Three-Dimensional Flow in a Turbine Nozzle Guide Vane Cascade

Won-Nam Yun*, Jin Taek Chung**

Key Words : Gas Turbine(가스 터빈), Turbine Cascade(터빈 캐스케이드), Guide Vane(안내깃), Secondary Flow(이차유동), Passage Vortex(통로와류), Contoured Endwall(변형된 끝벽), Suction Surface(흡입면), Cross Flow(횡단류), Contraction ratio(수축율)

ABSTRACT

The objective of this study is to document the secondary flow and the total pressure loss distribution in the contoured endwall installed linear turbine nozzle guide vane cascade passage and to propose an appropriate contraction ratio of the contoured endwall which shows the best loss reduction among the simulated cases. In this study, three different contraction ratio of contoured endwalls have been tested. This study was performed by experimental method and when the contoured endwall has the contraction ratio of 0.17 on exit height, the results showed the best loss reduction

기호설명

∩ : 수축율

— : 피치 방향 질량 평균 손실 계수

== : 평면 질량 평균 손실 계수

=== : 전체 압력 손실 계수 ($C_{pt}+C_{psk}$)

: 수축율에 의한 전체 압력 손실 감소율

1. 서론

가스터빈의 터빈 스테이지 내에는 말굽와류, 통로와류, 횡단류 등 복잡한 3차원 유동이 발생하게 된다. 주

유동 방향에 수직인 평면에 발생하는 이차유동은 터빈에 추가적인 공력손실을 야기시키고, 끝벽과 흡입면에 열용력이 집중되는 영역을 생성하게 된다. 가스터빈의 성능과 신뢰성 향상을 위한 많은 연구가 Langston 등(1)에 의해 수행되었으며 이차유동을 조절하여 이차손실을 감소시키는 방법으로 끝벽의 형상을 변화시키는 방법이 있다. Deich 등(2)은 끝벽의 형상 변화를 통하여 공력손실을 감소시킬 수 있음을 보였고, Koppe 등(3)은 Contoured endwall의 경우에 일반적인 Planar endwall 보다 이차손실이 크게 감소함을 확인하였다. 또한, Morris와 Hoare(4)는 서로 다른 형태의 Contoured endwall의 비교를 통해 3차원 곡선 형태가 이차손실 감소에 효과적이며, Moustapha와 Williamson(5)은 곡면의 형상이 다른 두개의 Contoured endwall의 비교를 통해 급격한 경사를 갖는 경우가 더 효과적임을 제시하였다. 이처럼 Contoured endwall의 곡면 형상에 관한 많은 연구를 통해서, Contoured endwall의 형상은

* 고려대학교 기계공학과 대학원

** 고려대학교 기계공학과

E-mail : adamman@korea.ac.kr

3차원 곡선 형태로써 비교적 급격한 경사를 갖는 경우가 손실 감소에 효과적이 들어났다. 그러나, 동일한 곡면의 형태를 갖으면서 수축율의 변화로 발생하는 공력 특성에 대한 연구는 미흡하다 할 수 있다. 이에 본 연구의 목적은 수축율이 다른 세 개의 Contoured endwall과 일반적인 Flat endwall 노즐 안내깃 캐스케이드에서의 3차원 유동을 비교함으로써 수축율에 의한 효과가 어떻게 영향을 받는가를 규명하는 것이다.

2. 실험 장치 및 방법

Fig. 1, Fig. 2는 소형 아음속 개방형 풍동에 장착된 선형 캐스케이드 시험부로서, 5개의 블레이드 사양은 Table 1과 같다. Fig. 3과 Table 2는 실험에서 사용된 Contoured endwall의 수축율을 나타낸다. 수축율은 다음 식으로 정의하였다.

$$CR = \frac{H_1 - H_2}{H_2} \quad (1)$$

본 실험에서는 주기성을 확보하기 위하여 미드스팬에서 속도 분포와 끝벽에서의 정압분포를 측정하였으

Table 1 Geometry of the blade

Chord (C)	230mm
Exit height (H ₂)	200mm
Axial chord to chord ratio (C _{ax} /C)	0.63
Aspect ratio (H ₂ /C)	0.65
Solidity (C/S)	0.87
Blade inlet angle (β ₁)	0°
Blade outlet angle (β ₂)	50.3°
Incidence angle	0°

Table 2 Experimental cases of contoured endwall

	FE	CE1	CE2	CE3
CR	0	0.17	0.34	0.51

며 유동 조절판을 이용하여 주기성을 조절하였다. 또한 경계층 두께와 난류강도는 I형 열선 유속계를 사용하여 측정하였으며, 3차원 유동 측정은 tip 외경이 3.2mm인 원추형 5공 프로브와 PSI사의 9000 series 압력장치를 이용하여 측정하였다.

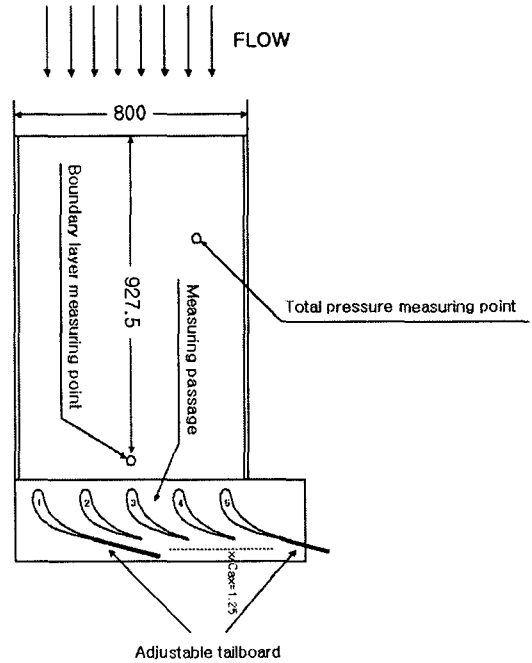


Fig. 1 Top view of the cascade test section

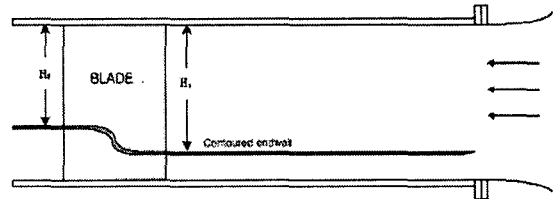


Fig. 2 Experimental facility

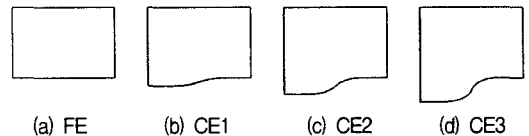


Fig. 3 Contoured endwall configurations

Contoured endwall 수축율의 변화에 의한 이차유동과 손실의 변화를 보기 위해서 통로 하류 x/Cax=1.25 위치에서 유동장을 측정하였고, endwall의 정압분포를 관찰하기 위하여 상부 endwall에 정압공 44개를 설치하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

본 실험에서 사용한 유동의 출구 레이놀즈수(Re_z)는 4×10^5 이고, 입구 자유 유동장의 난류강도는 0.7% 이내이며, 균일도는 벽면 경계층 부분을 제외한 영역에서 0.3% 이내이다.

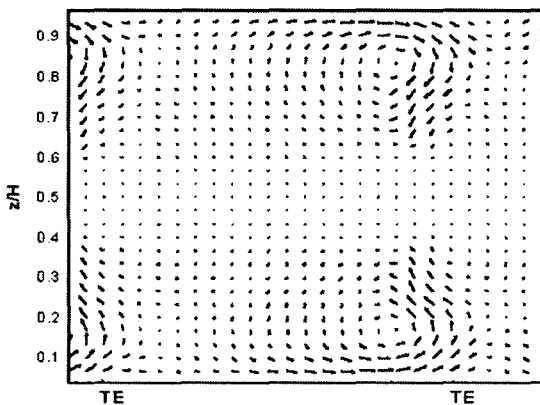
3.1. 이차유동 속도 분포

이차유동 감소효과를 비교하기 위하여 캐스케이드 하류에서 측정된 3차원 유동의 형상을 이차유동 속도 분포로 나타내었다.

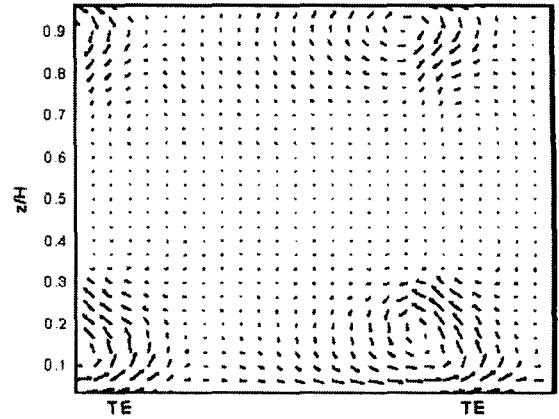
Fig. 4는 Flat endwall을 포함하여 각각의 수축율이 적용된 Contoured endwall 후류영역에서의 이차유동 속도분포이다.

(a)의 FE에서 측정된 이차유동 속도 분포에서는 블레이드 앞전에서 발생한 말굽와류의 압력면 성분이 흡입면으로 이동하여 흡입면 위치에서 강한 상승류를 발생시키는 것을 볼 수가 있다. 또한 블레이드 압력면과 흡입면의 압력차에 의해 발생하는 같은 방향으로 회전하는 횡단류와 결합하여 커다란 통로와류의 형상을 나타냄을 볼 수 있다.

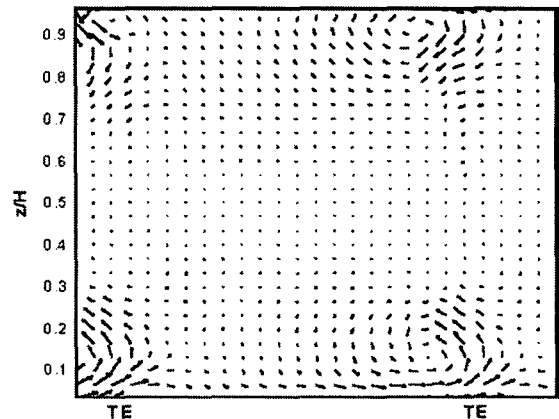
(b)의 CE1에서는 FE에서 나타났던 $z/H=0.3, 0.7$ 에서의 상승류가 조금 억제되는 모습을 관찰할 수 있다. 이것은 수축되는 contoured endwall에 의한 가속력이 횡단류가 흡입면 쪽으로 이동하는 것을 어느 정도 차단하는 것이라 생각한다. 또한, 가장 두드러지는 특징은 Flat side에서의 와류의 중심이 벽면 쪽으로 밀착되어 있음을 볼 수 있다. 와류의 중심이 벽면 쪽으로 더욱 밀착됨으로써 손실 영역이 줄어들게 되고, 와류의 세기도 약해짐을 볼 수 있다.



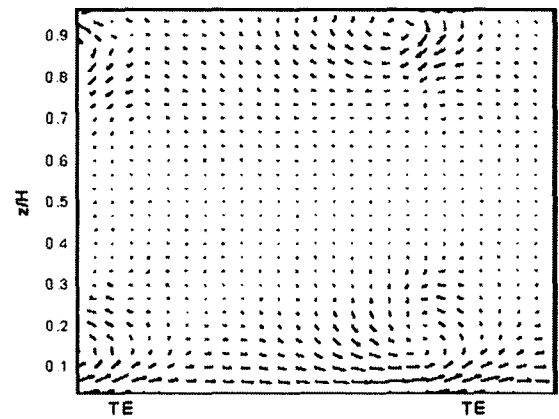
(a) FE



(b) CE1



(c) CE2



(d) CE3

Fig. 4 Vector plot of secondary velocities at wake region (a) FE (b) CE1 (c) CE2 (d) CE3

(c)의 CE2에서는 CE1과 거의 비슷한 이차유동 속도 분포를 나타내고 있지만, FE에서 두드러지게 나타났던 상승류가 거의 억제되어 있음을 볼 수 있다.

(d)의 CE3에서는 미드스팬 하부 영역인 Contour side에서 발생하는 통로와류의 형상이 제대로 관찰되지 못하고 있다. 이것은 수축율이 상대적으로 너무 크게 형성된 결과임을 보여주고 있다.

3.2. 전압 손실 분포

이차 손실 분포에 사용된 전압 손실 계수는 다음 식으로 구하였다.

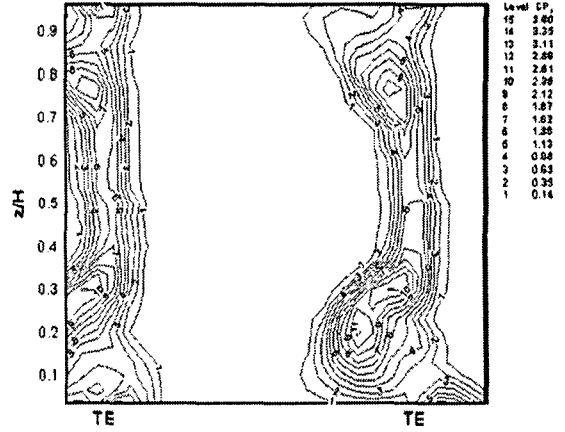
$$C_{p_t} = \frac{P_{t0} - P_t}{\frac{1}{2} \rho_0 U_0^2} \quad (2)$$

Fig. 5는 후류영역에서의 전압 손실 분포를 나타낸 것이다.

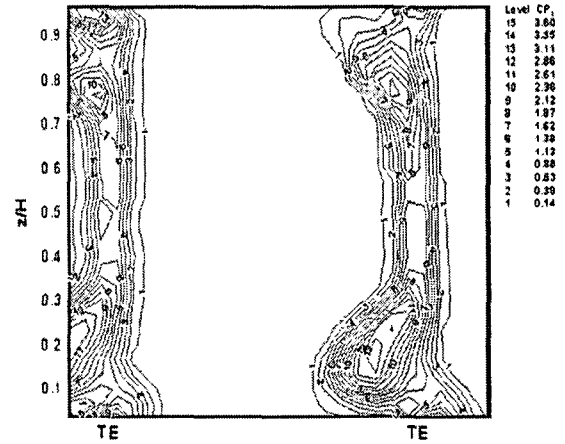
(a)의 FE에서는 전형적인 캐스케이드 후류 영역에서의 전압 손실 분포를 나타내고 있다.

블레이드 통로 내부에서 발달된 통로와류에 의한 넓은 손실 분포를 보여주고 있으며, 블레이드 끝단에서 발생된 shed vortex가 존재함을 볼 수 있다.

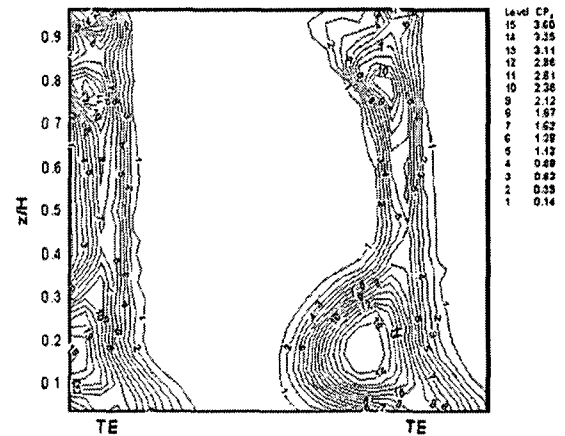
(b)의 CE1에서는 평면 전체에서 FE에 비해 손실 영역이 감소하였다. 미드스팬 하부 영역인 Contour side에서는 와류 중심 부분을 기준으로 손실 영역이 밀집되어 있음을 볼 수 있으며, 특히 미드스팬 상부 영역인 Flat side에서의 손실 영역은 현저하게 감소하였다. 반면, Contoured endwall에 의한 영향으로 Contour side에서 손실 영역은 줄었지만, 와류 중심의



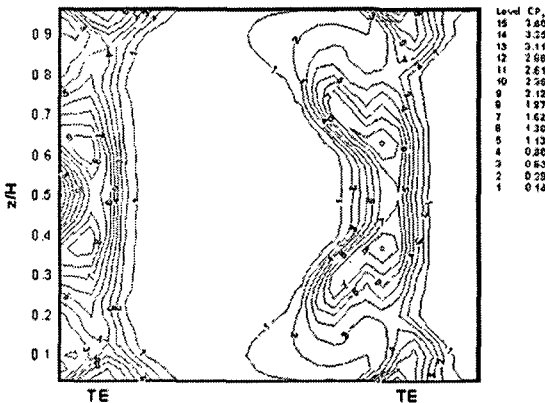
(b) CE1



(c) CE2



(d) CE3



(a) FE

Fig. 5 Contour plot of total pressure loss coefficient at wake region (a) FE (b) CE1 (c) CE2 (d) CE3

세기가 강해졌다. 이러한 높은 손실 영역이 밀집되어 있기 때문에 상대적으로 손실의 크기가 크다고 할 수 있다. 하지만, Flat side에서의 현격한 손실 영역의 저하로 인해 전체적으로는 손실의 저감을 가져오게 된다.

(c)의 CE2에서는 이차유동 속도 분포에서처럼 CE1과 비슷한 손실 영역을 나타내고 있다. 그러나 손실 손실의 크기가 CE1에 비해서 커져 있음을 확인할 수 있다.

(d)의 CE3에서는 Contour side에서 상대적으로 매우 큰 손실 영역이 형성됨을 알 수 있다.

3.3. 질량 평균 전체 압력 손실 계수 비교

Contoured endwall의 효과를 정량적으로 보기 위하여 후류 영역에서의 전체 압력 손실 계수와 그 감소율을 비교해 보았다. 전체 압력 손실 계수는 전압 손실 계수와 이차유동 손실 계수의 합으로 정의되고, 질량 평균 전체 압력 손실 계수 감소율의 정의는 다음의 식 (3), (4), (5)와 같다.

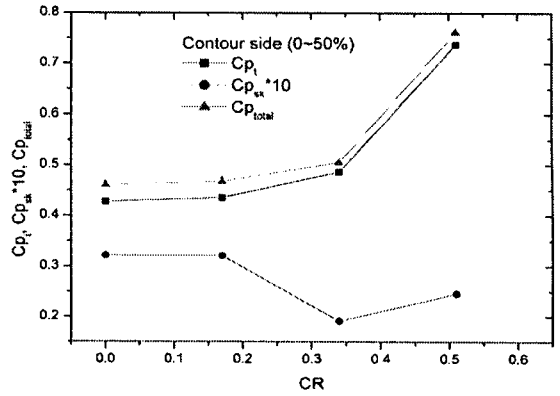
$$Cp_{sk} = \frac{\frac{1}{2} \rho v^2 + \frac{1}{2} \rho w^2}{\frac{1}{2} \rho_0 U_0^2} = \frac{v^2 + w^2}{U_0^2} \quad (3)$$

$$\overline{Cp_{total}} = \overline{Cp_i} + \overline{Cp_{sk}} \quad (4)$$

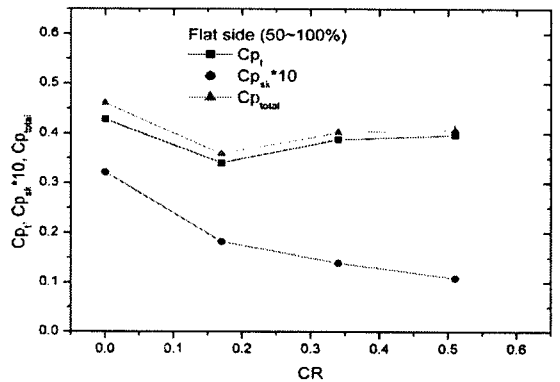
$$\eta_{cr} = \frac{\overline{Cp_{total, flat}} - \overline{Cp_{total, contoured}}}{\overline{Cp_{total, flat}}} \times 100(\%) \quad (5)$$

Fig. 6은 후류 영역에서의 질량 평균 전압 손실 계수, 이차유동 손실 계수, 전체 압력 손실 계수를 나타낸 것이다. (a) Contour side에서는 질량 평균 전체 압력 손실 계수가 점차적으로 증가하는 경향을 보이고 있다. 반면, (b) Flat side에서는 CR=0.17인 CE1에서 가장 많은 감소를 보였고, CE2와 CE3에서는 거의 비슷한 감소를 보였다. 결과적으로, Contoured endwall인 경우 끝벽의 형상을 변형시킴으로써 (a) Contour side에서는 추가로 발생한 이차유동에 의하여 손실이 증가하고, (b) Flat side에서는 통로와류의 크기가 작아짐으로써 손실이 감소한다.

Table 3은 이러한 손실 감소율을 수치적으로 나타내었다.



(a) Contour side



(b) Flat side

Fig. 6 Plane mass averaged $\overline{Cp_i}$, $\overline{Cp_{sk}}$ for all conditions at the wake region (a) Contour side (b) Flat side

Table 3 Overall loss coefficients at the wake region

	FE	CE1	CE2	CE3
$\overline{Cp_i}$	0.42807	0.38797	0.43708	0.56696
$\overline{Cp_{sk}}$	0.03221	0.02518	0.01658	0.01775
$\overline{Cp_{total}}$	0.46028	0.41316	0.45366	0.58472
(%)		10.2	1.4	-27.0

3.4. 정압 분포

Fig. 7은 상부 endwall에서의 정압 분포를 나타내고 있다. FE와 CE1에서 Flat side 벽면에서의 정압 계수를 비교해 보면, 캐스케이드 통로 내부의 횡압력 구배를 확인할 수 있고, 통로 끝부분에서의 정압 분포가 FE에서는 흡입면 쪽으로 이동하여 붙지만, CE1에서는 흡입면에 붙지 않고 통로를 빠져 나가는 것을 볼 수 있다. 이것은 Contoured endwall에 의해서 Flat side에

