

# 끝벽의 형상이 터빈 캐스케이드내 3차원 유동특성에 미치는 영향에 관한 전산해석

김대유\* · 정진택\*\*

## Numerical Analysis on Effects of the Contoured Endwall on the Three-dimensional Flow Characteristics in a Turbine Cascade

Dae-yu Kim\*, Jin-Taek. Chung\*\*

Key Words: Gas Turbine(가스 터빈), Turbine Cascade(터빈 캐스케이드), Secondary Flow(이차유동), Passage Vortex(통로와류), Contoured Endwall(변형된 끝벽), Suction Surface(흡입면)

### 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 cascade passage and to propose an appropriate height of the contoured endwall which shows the best loss reduction among the simulated contoured endwall. In this study, three different contoured endwalls have been tested which have different height. This study was performed by numerical method and the result showed the contoured endwall which has the height of 5% of the axial chord showed the best loss reduction rate.

### 기호설명

- $C$  : Chord
- PS : Pressure side
- SS : Suction side
- $\delta$  : Inlet boundary layer thickness
- $H$  : Span of the blade
- $C_{pt}$  : Total pressure loss coefficient

### 1. 서론

가스 터빈의 터빈 스테이지내에는 말굽와류, 통로와류, 횡단류등 복잡한 3차원 유동이 발생하게 된다. 주 유동방향에 수직인 평면에 발생하는 이와같은 이차유동은 터빈에 추가적인 공력손실을 야기시키고 끝벽과 흡입면에 열용력이 집중되는 영역을 생성하게 된다. 이러한 이차유동을 조절하기 위한 방법으로 끝벽의 형상을 변형하는 방법이 있다. Deichi<sup>1)</sup> 등은 끝벽의 형상 변화를 통해 공력 손실을 감소시킬 수 있음을 보였고, Kopper<sup>2)</sup> 등은 Flat-Contoured Endwall의 경우 일반적인 Double-Flat Endwall 보다 이차손실이 크게 감소함을 확인하였다. M. Hoeger<sup>3)</sup> 는 선행된 연구의 통계분석을 통해 공력감소에 효과적인 Contour의 높이는 축방향 코드길이의 6%이하임을 서술하였다. 또 Moustapha와 Williamson은<sup>4)</sup> 수축률이 다른 두개의 Contoured Endwall의 비교를 통해 급격한 경사를 가진 경우가 더 효과적임을 제시하는 등 많은 연구가 이루어졌으나 주로 실험에 의존하였기 때문에 끝벽의 형상을 변형하였을 경우에 대한 통로 내부의 유동특성은 고찰

\* 고려대학교 기계공학과 대학원

\*\* 고려대학교 기계공학과

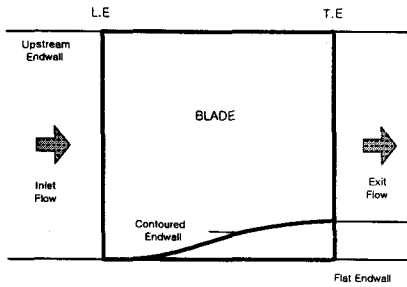


Fig. 1 Schematic of Contoured Endwall

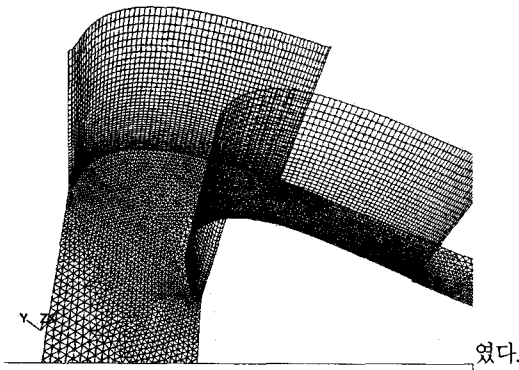


Fig. 2 Grid Structure

하지 못하였다. 이에 본 연구에서는 높이가 다른 세개의 Contoured Endwall과 일반적인 Flat Endwall의 가스 터빈내의 대한 공력특성을 전산해석을 통하여 규명하고자 한다. 본 연구의 목적은 선형 터빈캐스케이드 내의 3차원 난류유동을 규명하고, 다양한 높이의 Contour를 준 경우에 대한 공력특성을 비교, 분석하고 이차손실을 감소시킬 수 있는 적절한 끝벽의 형상을 제시하는 것이다.

## 2. 터빈 캐스케이드의 제원과 유동조건

해석에 사용된 블레이드는 입구각  $-35^\circ$ , 출구각  $72.5^\circ$  로  $107.5^\circ$ 의 선회각을 갖는다. 그 외 터빈 캐스케이드의 제원은 Table. 1에 표기하였다.

계산 조건은 기존의 실험과 동일한 조건<sup>5)</sup>을 사용하였는데, 유입 유동의 속도는 12m/s이며, 입구 레이놀즈 수는 블레이드의 코드길이를 바탕으로  $1.9 \times 10^5$ 이며 입구경계층 두께는 24mm이다. 입구 난류강도는 경계

층을 제외하고 0.7%이내이다. Contour의 높이는 축방향 코드길이를 기준으로 5%(8mm), 7%(12mm), 15%(24mm)이며, 블레이드 선단으로부터 출구쪽으로 서서히 수축시킨 meridional 형상으로 끝벽에 변화를 주었다. 본 연구에 사용된 Contour의 형상은 Fig. 1과 같다.

## 3. 연구방법

### 3.1 지배방정식 및 경계조건

본 연구에는 상용 전산해석 코드인 FLUENT(Ver. 6.0)를 사용하였다. 정상상태에 관한 전산해석을 수행하였으며 난류방정식으로는 식 (1)과 같은 RNG k- $\epsilon$  방정식을 사용하였다.

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M$$

$$\rho \frac{D\epsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \alpha_\epsilon \mu_{eff} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right) + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} - R$$

(1)

해석에 사용된 모델의 전체적인 형상 및 격자는 Fig. 2와 같다. 유로는 1개만을 모델링하여 반복되는 평면에 주기조건을 설정하였다. 격자의 형상은 전체 격자의 질을 향상시키기 위하여 tri-pave를 사용하였고 입구조건은 이<sup>5)</sup>의 실험에서 측정된 데이터를 사용하였고, 입구의 난류 성분은 고<sup>6)</sup>의 설정조건과 같이 난류점성비를 10으로 정하고 k와  $\epsilon$ 으로 환산하여 설정하였다.

Table. 1 Geometry of the blade

Chord (C)	230 mm
Axial chord to chord ratio ( $C_{ax}/C$ )	0.704
Aspect ration ( $H_b/C$ )	2.0
Solidity ( $C/P$ )	1.33
Blade inlet angle ( $\beta_1$ )	$-35^\circ$
Blade outlet angle ( $\beta_2$ )	$72.5^\circ$
Turning angle	$107.5^\circ$
Incidence angle	$0^\circ$

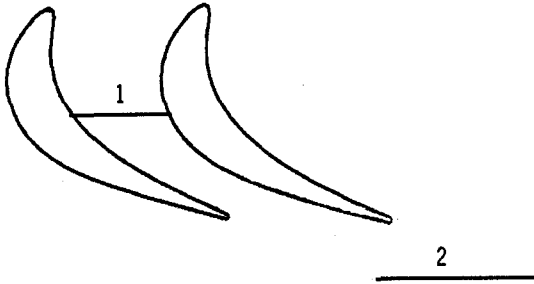


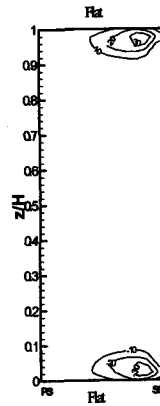
Fig. 3 Location of the planes

#### 4. 결과 및 고찰

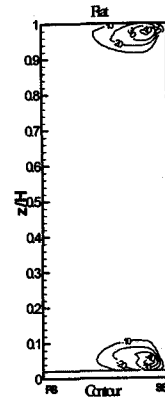
유로 내에서의 계산 결과를 도시하기 위해 Fig. 3과 같이 축방향 코드 길이의 0.5(plane1), 1.25(plane2)배 되는 위치에 평면을 설정하였다.

##### 4.1 유선방향 와도 분포

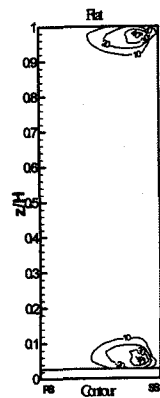
이차유동 감소효과를 비교하기 위하여 각 경우에 대한 유선방향 와도를 비교하였다. 유선방향 와도는 통로와류의 생성과 회전방향, 그리고 강도를 비교하는 척도가 된다. Fig. 4는 각 경우에 대한 plane1에서의 유선방향 와도분포이다. 와도의 값이 음의 값이면 압력면 말굽와류 성분과 같은 회전방향이고 양의 값이면 그 반대방향이다. (a)의 Flat Endwall 경우 압력면 말굽와류 성분이 흡입면으로 이동하여 흡입면에 강한 상승류를 발생시키는 것을 볼 수가 있다. 또한 미드스팬을 기준으로 상하 대칭 현상임을 볼 수 있다. 반면에 (b)에서는 와류중심의 강도가 약간 증가 하였지만, 전체적인 분포는 유사하다. 또한 유동이 가속되면서 vortex stretching의 효과로 Contour면의 와도가 flat면과 비교하여 중심의 와도는 크지만 영역이 축소되는 것을 확인할 수 있다. (c)와(d)와 마찬가지로 Contour가 시작되면서 와도중심의 위치가 흡입면으로부터 약간 떨어져 있는 것을 볼 수가 있고, 그 크기는 큰 차이를 보이지 않는다. 전체적인 와도가 (a)에 비하여 감소된 것을 볼 수가 있다. 하지만 Contour면의 와도 중심이 Flat한 경우와 비교하여 흡입면으로부터 약간 떨



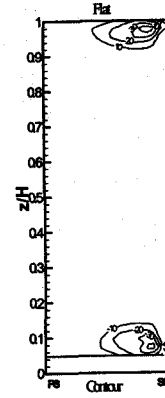
(a) Flat Endwall



(b) 8mm Contoured Endwall



(c) 12mm Contoured Endwall



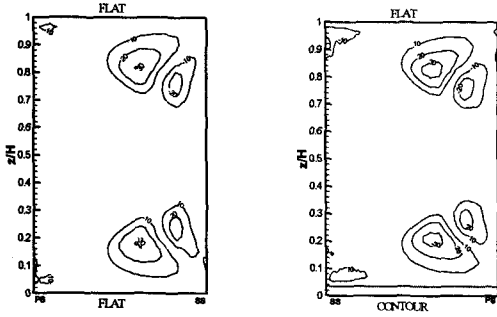
(d) 24mm Contoured Endwall

Fig. 4 Contour of streamwise vorticity at plane 1

어져 있음을 확인할 수 있다. 이는 가속되면서 횡단류의 영향이 일부 약해짐을 나타낸다.

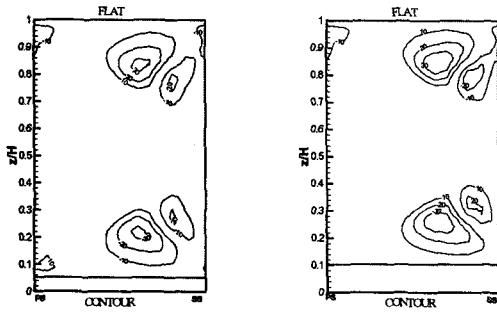
Fig. 5는 plane2, 즉 통로하류에서의 유선방향 와도 분포이다. (a)에서는 블레이드 후류 와류에 의해 통로와류의 옆에 반대 방향의 회전성분이 나타나는 것을 볼 수 있다. (b)에서는 유동의 와도가 더 강하게 나타나고 있음을 알 수 있다. (c)에서는 (b)와 거의 유사한 경향을 보이며, (d)의 경우는 가장 큰 와도를 보인다.

Fig. 4와 Fig. 5의 유선방향 와도를 볼 때 끝벽에 Contour가 횡단류를 저지시켜 통로와류의 와류의 성장을 저지하나 Contour에 의해 발생된 가속과 마찰효과로 인해 와도가 커지면서 전체적으로는 이차손실을 감소시키는 역할은 미미하였다.



(a) Flat Endwall

(b) 8mm Contoured Endwall



(c) 12mm Contoured Endwall

(d) 24mm Contoured Endwall

Fig. 5 Contour of streamwise vorticity at plane 2

## 4.2 전압손실계수의 분포

전압손실계수의 정의는 식 (2)와 같다.  $P_{t0}$ 는 입구에서의 전압이며  $U_0$ 는 입구의 자유유동 속도이다.

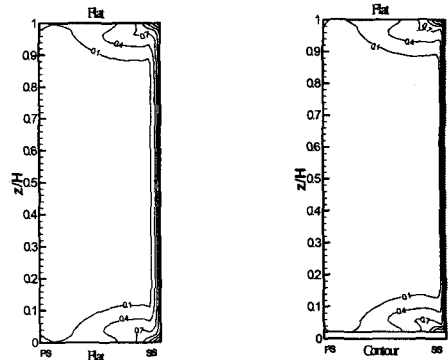
$$C_M = \frac{P_{t0} - P_t}{\frac{1}{2} \rho U_0^2} \quad (2)$$

Fig. 6은 plane1에서의 전압손실계수의 분포이다. (a)를 보면 통로 내의 횡압력구배에 의해 생긴 횡단류가 손실을 포함하는 끝벽 경계층내의 유동을 흡입면 쪽으로 밀고 있는 것을 볼 수가 있다. 그리고 흡입면 전체에 걸쳐 분포하는 손실영역은 흡입면을 통해 발달하는 경계층 내의 손실이다. 또한 미드스팬을 기준으로 상하 대칭의 형상이 뚜렷함을 볼 수 있다. (b)를 보면 손실영역이 감소한 것을 볼 수 있다. 이는 횡단류가 손실

영역을 흡입면쪽으로 이동시키는 효과가 Contour에 의한 가속효과로 인하여 저지되었기 때문이다. 또한 전체적으로 흡입면에 의해 발생한 경계층 손실이 감소한 것을 볼 수 있다. 또한 Flat면과 Contour면 근처 손실 영역에도 차이가 발생되며, Contoured Endwall 부분이 약간 감소하였다.

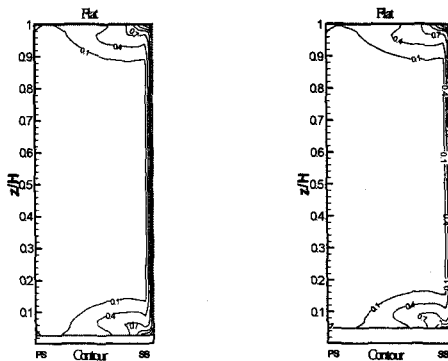
(c), (d)를 보면 (b)와 마찬가지로 블레이드의 흡입면쪽에 손실이 집중되는 것을 볼 수가 있으며 Contour에 의해 추가적으로 발생한 손실은 보이지 않는다. 따라서 plane1에서는 Contoured Endwall의 경우 모두가 전압손실 계수가 Flat Endwall(0.145)에 비해 감소하였으며, (b)의 경우가 전압손실계수 값이 가장 적다.(0.117)

Fig. 7은 plane2에 대한 전압손실 분포이다. (a)와 (b)를 비교해보면 (b)의 경우가 횡단류의 감소로 인해 손실영역이 통로내부로 확대되는 것이 저지되면서 끝벽 근처에 넓게 분포하며, 각각의 경우 흡입면과 압력면에서 발생한 경계층의 발달이 감소하였음을 볼 수 있다.



(a) Flat Endwall

(b) 8mm Contoured Endwall



(c) 12mm Contoured Endwall

(d) 24mm Contoured Endwall

Fig. 6 Contour plot of total pressure loss coefficient at plane 1

(c)를 보면 전체적인 형상은 (b)와 유사하나 끝벽이 Contour에 의해 상승함에 따라 끝벽에서 발생한 손실이 커지면서 (b)에 비해 손실이 증가하고 있다. 또한 손실영역의 중심사이가 가까워지면서 앞에서 언급한 상대적으로 강한 와도의 영향으로 손실영역이 미드스팬 영역으로 확대됨을 확인할 수 있다. 상하 대칭의 구조가 비대칭으로 바뀌기 시작하면서 Contour면의 마찰손실이 증가하지만 기존의 연구에서처럼 Flat면의 손실 감소가 뚜렷이 나타나지 않기 때문에 전체손실이 증가하게 된다. 끝벽이 더 높아지는 (d)의 경우에는 이러한 현상이 더욱 뚜렷해짐을 확인할 수 있다.

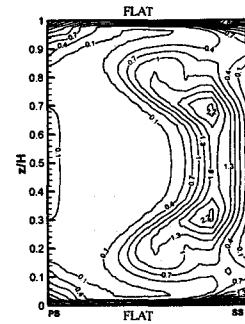
### 4.3 질량평균 전압손실계수의 비교

Contoured Endwall의 효과를 정량적으로 보기 위하여 plane2에서 각각의 경우에 대한 전압손실계수와 그 감소율을 비교해 보았다. 끝벽 및 기타 이차손실의 영향이 적은 미드스팬 영역(10% of span)의 손실을 날개 형상손실(profile loss)로 정의하고, plane2에서의 질량평균에서 빼주어 이차손실을 계산하였다.<sup>2)</sup>

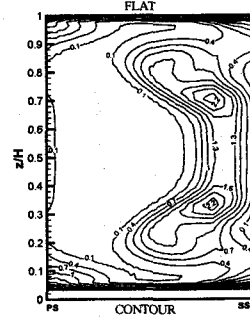
Table. 2의 질량평균 손실비교 계산 결과를 보면 Contoured Endwall의 경우 끝벽의 형상을 변형하므로써 추가로 발생한 이차유동보다 통로와류의 발달이 저지되어 나타나는 이차유동 감소의 효과가 더 클 경우 손실이 감소함을 알 수 있다.

Table 2. Overall pressure loss coefficient at plane2

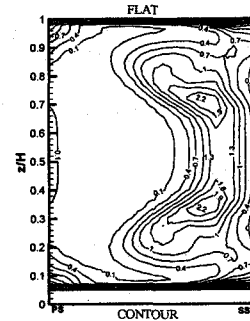
	Flat endwall	8mm Contoured endwall	12mm Contoured endwall	24mm Contoured endwall
(0-50%) CONTOUR SIDE				
overall	0.504	0.493	0.516	0.609
profile	0.333	0.318	0.326	0.384
secondary	0.172	0.175	0.190	0.225
(50-100%) FLAT SIDE				
overall	0.504	0.485	0.504	0.588
profile	0.333	0.318	0.326	0.384
secondary	0.172	0.167	0.178	0.204
(0-100%) OVERALL				
overall	0.504	0.489	0.510	0.598
profile	0.333	0.318	0.326	0.384
secondary	0.172	0.171	0.184	0.214



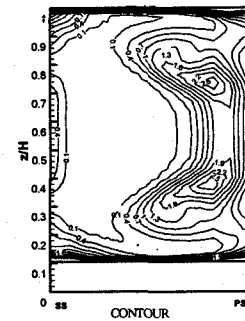
(a) Flat Endwall



(b) 8mm Contoured Endwall



(c) 12mm Contoured Endwall



(d) 24mm Contoured Endwall

Fig. 7 Contour plot of total pressure loss coefficient at plane 2

8mm Contoured Endwall의 경우에 Flat endwall과 비교하여 3.3% 감소하였으며 나머지의 경우는 오히려 손실이 증가하였다. 또한 기존 연구와 마찬가지로 Flat한 면에서 더 큰 손실의 감소효과를 확인할 수 있었다.

## 5. 결 론

선형 터빈 캐스케이드의 끝벽에 다양한 높이로 형상에 변화를 주었을 경우, 전산해석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 끝벽을 수축시켜 형상의 변화를 주었을 때 블레이드의 선단에서 발생하는 압력면 말굽와류 성분이 흡입면으로 이동하면서 발달하는 것을 차단하는 효과를 보여주었으나 특정 높이 이상에서는 와도의 증가로 효과가 상쇄됨을 보였다.
- 2) Flat Endwall 경우, 통로내의 횡압력구배에 의해 생긴 횡단류와 상승류가 손실을 동반한 끝벽 경계층내의 유동을 흡입면쪽으로 이동시키고 상승시켜 손실이 분포하는 영역을 통로 내부로 확대시킨 반면에, 특정한 높이의 Contoured Endwall에서는 횡단류가 감소되어 통로내부로의 확대가 저지되었다.
- 3) 이차손실을 계산한 결과, Contoured Endwall이 이차유동을 감소시키는 효과가 있으며 특히 Contoured Endwall의 Flat면에서 감소함을 확인하였다.
- 4) 질량평균 전압손실계수를 계산한 결과, 축방향 코드 길이의 5%인 8mm의 높이를 갖는 Contoured

Endwall의 경우가 3.3%의 가장 큰 손실 감소율을 보였다.

## 참고문헌

- (1) Deich, M. E., Zaryankin A. E., Phillipov, G. A., and Zatsepin, M. F., 1960, "Method of Increasing the Efficiency of Turbine Stages with Short Blade," *Teploenergetika*, vol. 2, pp. 240~254
- (2) Kopper, F.C., Milano, R., 1981, "Experimental Investigation of Endwall Profiling in Turbine Blade cascade," *AIAA Journal*, Vol. 19, No8, pp.1033~1040
- (3) Hoegen, M., 1998, "On The Performance Of Compressor Blades With Contoured Endwalls" MTU Aero Engines, Compressor Department, <http://www.mtu.de>
- (4) Mustapha, S. H., and Williamson, R. G., 1986 "Effect Of two Endwall Contours on the Performance of an annular Nozzle Cascade" *AIAA Journal*, Vol. 84 No.9
- (5) 이용진, 1996, "경계층내 장애물이 가스터빈내 3차원유동에 미치는 영향에 관한 전산해석," 고려대학교 기계공학과, 공학 석사 논문
- (6) 고성룡, 1997, "장애물이 있는 3차원 터빈 캐스케이드내 난류유동의 전산해석," 고려대학교 기계공학과, 공학 석사 논문