

## 끝벽의 형상이 터빈 캐스케이드 내 열전달 특성에 미치는 영향에 관한 전산해석

이우상\*·윤덕규\*\*·곽현주\*\*\*·정진택\*\*\*\*

### Numerical Analysis on Heat Transfer Characteristics of the Contoured Endwall in a Turbine Cascade

Wu sang Lee\*, Deok kyu Yoon\*\*, Hyun ju Kwag\*\*\*, Jin Taek Chung\*\*\*\*

Keywords : Gas turbine(가스터빈), Turbine Cascade(터빈 캐스케이드), Three-dimensional flow(삼차원유동)  
Contoured Endwall(변형된 끝벽) Stanton Number(스탠튼 넘버), Contraction ratio(수축률)

#### Abstract

The Objective of this study is to document the three-dimensional flow in a turbine cascade with Contoured endwall in terms of Stanton number distribution to proposes an appropriate contraction ratio of endwall contouring which show the best performance. This study was numerically performed. The results show that heat transfer coefficient on the contoured endwall which has the height of 15% of the axial chord showed best performance. The numerical method and results in this study can be applied to the design of gas turbine cascade with high performance.

#### 1. 서론

변형된 끝벽(contoured endwall)에 대한 연구는 Diech등[1]이 끝벽의 변화를 통해 공력손실을 감소시킬 수 있음을 보였고, Moustapha와 Williamson[2]은 수축률이 다른 C자형과 S자형의 두 개의 contoured endwall의 비교를 통해 급격한 경사를 가진 S자형의 경우가 더 효과적임을 제시하였으며 M. Hoeger[3]는 선행된 연구의 통계분석을 통해 공력감소에 효과적인 변형끝벽의 높이는 축방향 코드길이의 6%이하임을 서술하였다. Morris와 Hoare[4]는 안내깃 캐스케이드에서 형상비와 곡면 위치를 달리한 4개의 곡면 끝벽(contoured endwall)을 비교하였을 때, 낮은 형상비에서 S형태의 경우에 가장 효율이 좋으며 전체 이차손실이 25% 감소함을 보였다. Kim[5]은 축방향 코드 길이의 5%인 8mm의 높이를 갖는 contoured endwall의 경우가 가장 큰 공력 손실 감소율을 보였음을 보였다.

하지만 기존의 연구는 주로 실험에 의지하였으며 끝벽의 형상을 다양하게 변화시켰을 경우의 열전달 특성은 고찰하지 못하였다. 이에 본 연구에서는 Contoured endwall과 일반적인 Endwall의 가스터빈 내의 유동특성과 열전달특성을 전산해석을

통해 규명하고자 한다. 본 연구의 목적은 다양한 높이의 contour를 준 경우에 대한 열전달특성을 비교하고 가장 우수한 열전달 특성을 보이는 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. 계산조건은 기존의 이[6]의 실험과 동일한 조건을 사용하였는데, 유입 유동의 속도는 12m/s이며 입구 레이놀즈수는 블레이드 코드길이를 바탕으로  $1.7 \times 10^5$ 이며 입구경계층 두께는 24mm이다. 입구 난류강도는 경계층을 제외하고 0.7%이내이다. 균일도는 벽면 경계층 부분을 제외한 영역에서 0.3%이내이다. 허브쪽 끝벽의 Contour 높이는 이[6]의 실험결과를 바탕으로 특정입구 경계층 두께에 대하여 비축거리를 기준으로  $x=0$ 인 지점으로부터 변형이 시작되어 trailing edge에서의 끝벽의 높이가 5%(8mm), 10%(16mm), 15%(24mm)의 높이를 갖는 S자 형태의 곡면 끝벽을 설치하였으며, 블레이드 선단으로부터 출구쪽으로 서서히 수축시킨 meridional 형상으로 끝벽에 변화를 주었다. 본 연구의 사용된 Contour의 형상은 Fig. 1과 같다. 한편 Table.2는 본 연구와 동일한 조건에서 실험결과로 얻은 이[7]의 캐스케이드 실험조건이다. 입구 유동조건은 블레이드의 앞면으로부터 300mm 앞에서 측정을 하였으며 본 연구에서는 이를 경계조건으로 사용하였다.

\* 고려대학교 기계공학과 대학원, leewusang@korea.ac.kr

\*\* 고려대학교 기계공학과 대학원, ydk5898@korea.ac.kr

\*\*\* 고려대학교 기계공학과 대학원, junykwag@korea.ac.kr

\*\*\*\* 고려대학교 기계공학과, jchung@korea.ac.kr

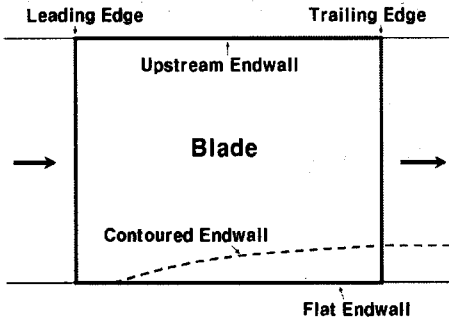


Fig. 1 Contoured Endwall configuration

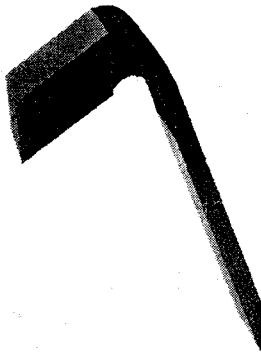


Fig. 2 Grid Structure

### 3. 연구방법

#### 3.1 지배방정식 및 경계조건

캐스케이드내 끝벽에서의 국소열전달 분포는 Stanton number 로 표현하였고 다음과 같은 식으로 계산되었다.

$$h_c = \frac{q''}{(T_w - T_\infty)} \quad [W/m^2 K] \quad (1)$$

$$St_t = \frac{h_c}{\rho_\infty C_p U_\infty} \quad (2)$$

유입 유동의 온도( $T_\infty$ )가 일정할 때 벽면에서의 온도를 이용하면 식(1)과 식(2)를 통해 국소 열전달 계수와 Stanton number 를 각각 구할 수 있다. 여기서  $q''$ 는 단위 면적당 익형표면에 가해진 열량으로 본 연구에서 모사한 양기의 실험에서 사용된 값과 유사한 값인  $2000W/m^2 K$  를 사용하였다.

#### 4. 유동 해석 결과 및 고찰

##### 4.1 끝벽에서의 열전달

Fig.3에서 Fig.6까지 Flat Endwall과 일정한 높이를 가진 변형된 끝벽에서의 Stanton 값의 분포를 나타낸다. Fig.3에서, 블레이드 앞전에서 발생하는 역압력 구배로 인한 말굽와류의 생성과 그것에 의해 생기는 모서리 와류의 발달로 인한 열적 구배를 보여주고 있다. 주유동이 통로로 진행하면서 압력면 성분과 흡입면 성분으로 나뉘지게 된다. 흡입면 쪽에서는 블레이드의 압력면 성분의 발달로 말굽와류와 통로와류의 영향으로 블레이드에 직접 접촉하기 때문에 열전달이 활발히 일어나고 있음을 보이고 있다. 캐스케이드 통로 전반부에서는 횡단류가 주유동과 만나는 박리선까지는 활발한 횡단류의 작용으로 열전달이 활발히 일어

나는 것을 볼 수 있었다. 흡입면 쪽의 영역은 St.값의 구배가 상대적으로 크게 나타났는데 이는 통로의 하류로 진행하면서 유동은 통로와류의 발달과 이에 수반된 모서리 와류의 영향으로 흡입면 근처 영역에서 열전달이 압력면 근처 영역보다 더 크게 나타나기 때문이다. 이러한 경향들, 즉 끝벽 전반부에서 말굽와류로 인한 국부적 열전달의 증가와 끝벽 하류 부근에서의 흡입면 근처에서 모서리 와류와 통로 와류로 인한 열전달 증가는 캐스케이드 끝벽에서 발생하는 일반적인 열전달 현상으로 양기의 실험에서도 동일한 결과를 보이고 있다. 또한 통로의 형상이 하류 방향으로 진행하면서 갈수록 좁아지는 노즐의 모양을 하고 있기 때문에 하류방향으로 진행하면서 주유동의 가속 효과로 인해 전체적인 St.값이 커지는 것도 알 수 있었다.

Fig. 4에서 보이는 8mm높이로 변형된 끝벽에서의 열전달은 Flat endwall에 비해 St.값이 점차 국부적으로 증가하는 경향을 보였는데 이는 끝벽이 변형되면서 통로 내부의 횡방향 압력구배 및 종방향 압력 구배를 변화시키게 되고, 통로의 수축으로 인해 곡면 끝벽 유동이 빠르게 가속되기 때문이다. 같은 원리로 곡면의 변형율이 커질수록 St.값이 증가하는 이유는 발생하는 유동이 더욱 강한 가속력이 부여되기 때문이라고 생각할 수 있다. 또한 변형된 끝벽에서도 블레이드 앞전 부근에 압력면과 흡입면 말굽와류 성분에 의해 국부적으로 St.값이 크게 나타나고 열적구배가 크게 나타나는 영역을 관찰할 수 있었다. 하류로 가면서 최대값을 보이고 다시 감소하는 현상을 볼 수 있는데 이는 통로 와류가 흡입면을 따라서 상승하는 현상으로 인해 나타나는 현상이다.

Fig.5 와 Fig.6 에서도 유로가 변화하면서 속도가 증가하기 때문에 St.값이 전체적으로 증가하고 있음을 볼 수 있으며 흡입면 말굽와류 성분에 의해 나타나는 열적 구배가 Flat endwall에 비해 국부적인 크기는 크지만 블레이드 후류로 갈수록 확연히 줄어들음을 볼 수 있었다.

##### 4.2 흡입면에서의 열전달

열전달 현상에서 3차원 유동에 의해 영향을 많이 받는 영역은 흡입면이며, 변형된 끝벽의 효과도 이 영역에서 더 분명히

Table. 1 Geometry of the blade

Chord(C)	230mm
Axial chord to chord ratio ( $C_{ax}/C$ )	0.704
Aspect ratio( $H_b/C$ )	2.0
Solidity(C/P)	1.33
Blade inlet angle ( $\beta_1$ )	-35°
Blade outlet angle( $\beta_2$ )	72.5°
Turning angle	107. 5°
Incidence angle	0°

Table. 2 Inlet conditions of the previous test

Reynolds number ( $Re_{ch} = U_\infty \cdot C/\nu$ )	$1.7 \times 10^5$
Boundary layer thickness( $\delta$ )	24mm
Displacement thickness( $\beta^*$ )	3.20mm
Momentum thickness( $\beta^{**}$ )	2.47mm
Shape factor( $H_{sf} = \beta^*/\beta^{**}$ )	1.29
Turbulence intensity	0.7 %

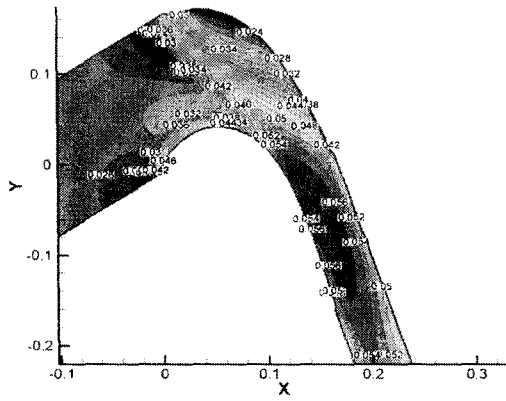


Fig.3 St. distribution for flat endwall

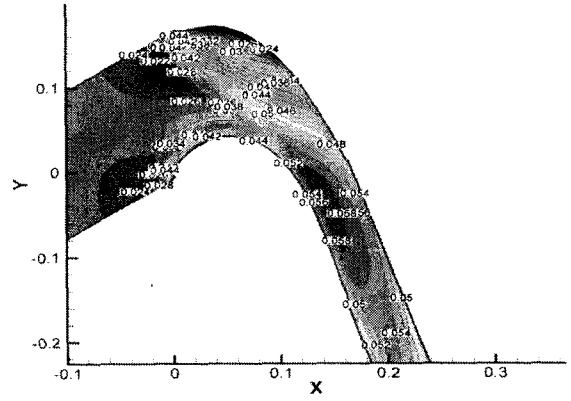


Fig.5 St. distribution for 16mm endwall

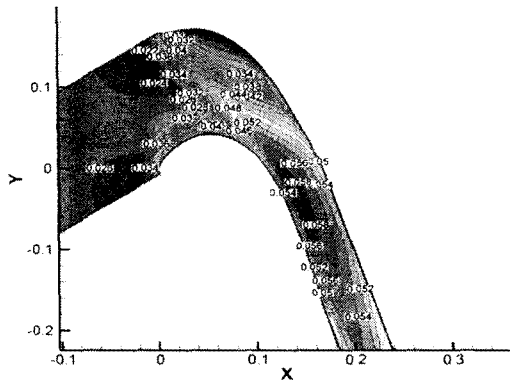


Fig. 4 St. distribution for 8mm endwall

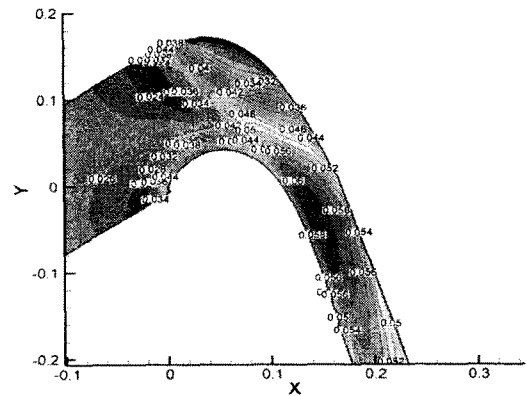


Fig. 6 St. distribution for 24mm endwall

나타남을 알 수 있었다. 통로와류의 발달에 의해 흡입면 부근의 St.값이 증가하고 열적구배가 큰 삼각형 모양의 영역이 나타나는 것을 확인하였다. 특히 유동의 박리가 일어나는 지점에서는 St값이 작아짐을 겪고 흡입면 후류에서는 박리되었던 유동이 재부착되면서 St값이 커짐을 볼 수 있었다.

Fig. 7은 Flat endwall의 경우를 보여주고 있다. 흡입면에서의 열전달 분포의 가장 큰 특징은  $x=0.05$  인 지점부터 뒷전까지 St.값이 증가하고 열적 구배가 급격한 삼각형 모양의 영역이 나타난다는 것인데, 이는 압력면 말굽와류 성분이 흡입면으로 이동하여 발달된 통로와류에 의해 나타나는 현상이다. 이러한 현상은 급격한 열적구배에 의해 열응력을 증가시켜 재료의 파손을 야기하고, 재료의 수명을 단축시키는 역할을 하게 된다.

Fig. 8은 끝벽의 높이가 8mm인 블레이드의 흡입면을 보여주고 있다. Fig. 7에서 보이는 Flat endwall의 열전달 특성은 끝벽의 경계층 효과로 인해 유동이 지연되어 끝벽에 가까운 쪽의 St.값이 크고 블레이드의 중앙부분으로 갈수록 St. 값이 작아짐을 확인할 수 있었지만 Fig. 8에서는 경계층에 의한 효과가 작아지고 유동의 속도가 일정하여 St. 값도 일정해짐을 볼 수 있었다. 또한 블레이드의 끝벽쪽에 발생하였던 열적구배가 급격한 삼각형 모양의 영역이 전체적인 유동의 속도가 증가함에 따라 블레이드 후류까지 진행되어 가고 있음을 알 수 있었다.

Fig. 9에서는 끝벽의 높이가 16mm인 블레이드의 열전달 특성을 보여주고 있다. 끝벽의 높이가 8mm인 경우보다 통로가 좁아짐으로 인해 미드 스펀 영역에서 속도가 증가함을 볼 수 있었다. 끝벽의 변형률이 커지면서 일어나는 속도의 증가로 인해 흡입면 끝쪽에서 일어나는 복잡한 와류로 인해 열전달이 국부적으로 일어나고, 또한 국소적으로 블레이드에 열응력이 집중되어

손실이 일어날 수 있음을 볼 수 있었다.

Fig. 10에서는 끝벽의 높이가 24mm인 블레이드의 열전달 특성을 보여주고 있다. 끝벽 변형률이 커질 수록 전체적인 St 값은 증가함을 확인할 수 있었다. 이도 역시 급격한 열적 구배로 인해 열응력이 발생할 가능성이 있다고 생각된다.

#### 4.3 유동현상과 열전달 현상에 대한 고찰

본 연구는 변형된 끝벽을 설치하여 주유동의 속도와 여러 와류들의 지연 및 발달로 인해 캐스케이드 끝벽과 블레이드 흡입면에서 열전달 현상을 관찰하였다. 연구 결과 블레이드 흡입면과 끝벽에서의 열전달은 변형된 끝벽에서 높이가 높아질수록 St. 값이 전체적으로 증가함을 알 수 있었다.

#### 5. 결론

선형 터빈 캐스케이드의 끝벽에 다양한 높이로 형상에 변화를 주고 전산해석한 결과는 다음과 같다.

1) 압력면 말굽와류와 흡입면 말굽와류 성분에 의해 블레이드의 앞전 부분에 열전달이 활발하게 일어나는 영역이 나타났고 뒷전으로 갈수록 가속에 의해 St 값이 증가하는 분포가 나타났으며 최대값은 통로와류가 끝벽으로부터 상승하는 위치에 나타난다. 변형률이 커질수록 통로가 좁아지므로 유동의 속도가 빨라져서 St값이 커짐을 알 수 있었다.

2) 끝벽의 형상변화율이 증가할수록 일반적인 평면 끝벽의 캐

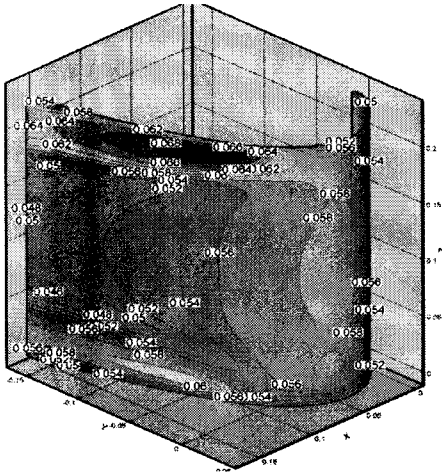


Fig.7 Suction side St. distribution for flat endwall

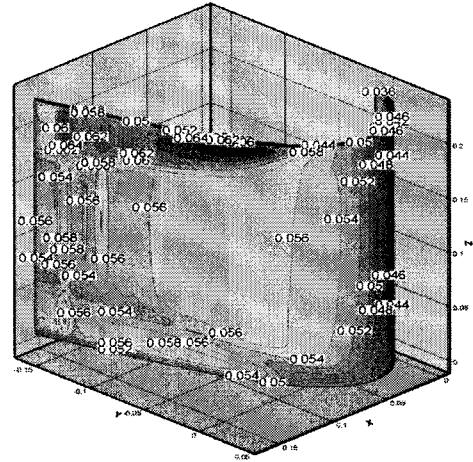


Fig.9 Suction side St. distribution for 16mm endwall

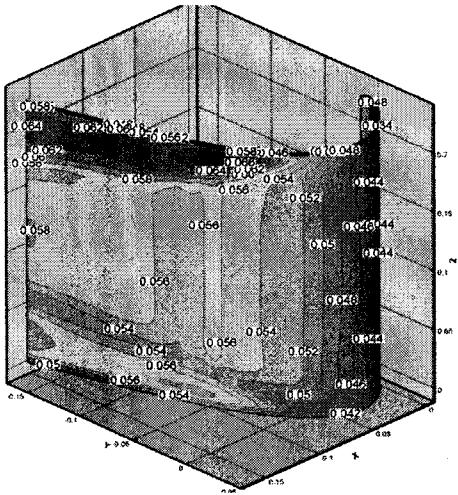


Fig. 8 Suction side St. distribution for 8mm endwall

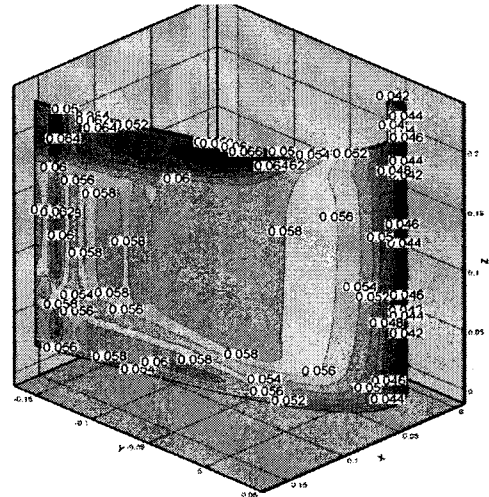


Fig. 10 Suction side St. distribution for 24mm endwall

스케이드에 비해 곡면 끝벽 부근에서 발생하는 유동의 가속효과로 인해 열전달이 활발히 일어나는 영역이 증가하였지만 추가적으로 발생하는 와류에 의해 열적구배가 큰 영역이 국소적으로 확장되었다

## 후 기

본 연구는 한전전력연구원이 지원하는 전력산업연구개발사업 및 2006년도 두뇌한국 21사업에 의하여 지원되었으며 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- [1] Deich M.E., Zaryankin A. E., Phillipov, G. A., and Zatselin, M. F., 1960, "Method of Increasing the Efficiency of Turbine Stages with Short Blade," *Teplotoenergetika*, Vol. 2, pp. 240~254
- [2] 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

- [3] Hoeger, M., 1998, "On The Performance of Compressor Blades With Contoured Endwalls" MTU Aero Engines, Compressor Department.

- [4] Morris, A. W., and Hoare, R. G., 1975, "Secondary Loss Measurements in a Cascade of Turbine Blades With Meridional Wall Profiling", ASME paper No. 75 - WA/GT-13

- [5] 김대유, 2002, "끝벽의 형상이 터빈 캐스케이내 3차원 유동특성에 미치는 영향에 관한 전산해석" 고려대학교 기계공학과, 공학 석사 논문

- [6] 이용진, 1996, "경계층내 장애물이 가스터빈 내 3차원 유동에 미치는 영향에 관한 전산해석." 고려대학교 기계공학과, 공학 석사 논문

- [7] 양동태, 1997, "경계층 펜스가 선형 캐스케이드 내에서의 열전달 특성에 미치는 영향에 관한 연구" 고려대학교 기계공학과, 공학 석사 논문