

# 일반적인 블레이드 형상에서의 앞전 모서리 홈에 의한 말굽와류 제어

조종재\* · 최병익\* · 김재민\* · 김귀순\*\*

## Controlling Horseshoe Vortex by the Leading-Edge Chamfer Groove in a Generic Wing-Body Junction

Jongjae Cho\* · Kuisoon Kim\*\*

### ABSTRACT

The aerodynamic losses so attributed to the endwall - usually termed secondary flow losses or secondary losses - can be as high as 30~50% of the total aerodynamic losses in a blade or stator row. Inlet guide vanes, with lower total turning and higher convergence ratios, will have smaller secondary losses, amounting to as much as 20% of total loss for an inlet stator row. These are important part for improving a turbine efficiency. The present study deals with a leading edge chamfer groove on a wing-body to investigate the vortex generation and characteristics of a horseshoe vortex with the installed height, and depth of the groove. The current study is investigated with FLUENT™.

### 초 록

터빈 익렬 내에서 발생하는 2차유동은 터빈 익렬에서 전체 공기역학적 손실의 30~50%, 입구 스테이 터에서는 약 20%를 차지하며 터빈 효율 향상에 있어 개선해야 될 중요한 부분으로 인식되고 있다. 본 논문에서는 블레이드 앞전에 모서리 홈을 만들어 홈의 높이 및 깊이 등의 형상 변수를 변화시켜가면서 말굽와류의 발생 영역 및 강도의 감쇄 특성 및 구조에 대해 상용코드인 FLUENT™를 이용하여 수치해석적인 방법으로 연구하였다.

Key Words: Horseshoe Vortex(말굽 와류), Secondary Flow Losses(2차 유동 손실), Leading-Edge Chamfer Groove(블레이드 앞전 모서리 홈)

### 1. 서 론

터빈 익렬 내에서 발생하는 3차원 유동현상으로는 익렬유로 (cascade passage)에서 발생하는 2차유동(secondary flow)과 말단간극 (tip clearance)의 누설유동 (leakage flow) 등이 있다. 이 중 2차유동에 의해 발생하는 손실은 터빈 익렬 (turbine cascade)

\* 부산대학교 항공우주공학과 대학원

\*\* 부산대학교 항공우주공학과

연락처, E-mail: spacecho@pusan.ac.kr

에서 전체 공기역학적 손실 (total aerodynamic loss)의 30~50%, 입구 스테이터 (inlet stator)에서는 약 20%를 차지하며 터빈 효율 향상에 있어 개선해야 될 중요한 부분으로 인식되고 있다 [1].

터빈 전체 손실에 있어서 큰 부분을 차지할 뿐만 아니라 열전달 특성과도 밀접한 관련을 가지고 있는 2차유동은 Fig. 1에서 도시한 바와 같이 크게 익렬면과 끝벽 (endwall)에서의 경계층, 익렬 앞전 (leading edge)과 끝벽이 만나는 곳에서 발생하는 말굽와류 (horseshoe vortex), 익렬 유로 내부에서 발생하는 유로와류 (passage vortex), 익렬면과 끝벽이 만나는 모서리에서 발생하는 모서리과류 (corner vortex) 등으로 구성되어있다 [2]. 특히, Fig. 1의 Sharma에 의해 연구된 2차유동 도시 모델에서 볼 수 있듯이 흡입면 말굽와류의 경우 유동의 후류 (downstream)로 흘러감에 따라 벽면의 측면유동 (cross flow)과 상호작용하여 유로와류로 전환되고 그 크기가 커지는 것을 알 수 있다.

이러한 터빈 손실 및 열전달 특성과 관련되어 매우 중요한 2차유동에 대한 많은 연구들이 Sharma [1], Langston [2] 등에 의해 수행되어졌다. 또한 이러한 2차유동에 의한 손실을 감소시키기 위해 다양한 방법들이 고려되었다.

특히, 본 연구에서 수행한 말굽와류 발생 감쇄를 위한 연구의 경우, 과거부터 많은 연구자들에 의해 연구되어왔다. 익렬 앞전에 윤곽형상 (fillet)을 설치하여 말굽와류의 발생을 억제하는 방법, 익렬 앞전에 스트레이크 (strake) 장착하는 방법, 익렬 앞전 바닥면의 경계층을 흡입하는 방법, 전구 (bulb)형태의 익렬 앞전 윤곽형상을 설치하는 방법 등 다양한 방법들을 이용하여 말굽와류 감쇄를 위해 노력하였다.

본 논문에서는 블레이드 앞전의 간단한 형상 수정을 통한 말굽와류의 발생 강도의 감쇄에 대해 상용코드인 FLUENT™를 이용하여 수치해석적인 방법으로 연구하였다. 블레이드 앞전에 모서리 홈 (chamfer groove)을 설치하여 기존의 감쇄 방법과는 다른 방법으로 말굽와류의 감쇄를 시도하였으며 블레이드 앞전에 설치된 모서리 홈의 높이 및 깊이에 대한 와류 감쇄 특성 및 구조에 대해 살펴보았다.

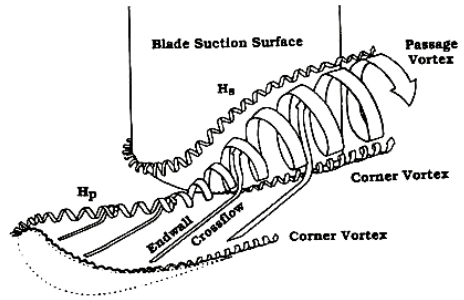


Fig. 1 Secondary Flow Vortices [1]

## 2. 본 론

### 2.1 수치해석 기법 및 모델

본 연구에 사용된 해석 기본모델로는 Ölçmen, S. and Simpson, R. [3][4]의 모델을 사용하였다. 블레이드는 NACA 0020의 기본 형태에 앞전의 횡단면 (cross section)이 3:2의 타원형태를 가진다. 코드길이 (chord length,  $c$ )는 30.5 cm, 두께 (thickness,  $t$ )는 7.17 cm이다.

유동해석 도구로는 상용 소프트웨어인 FLUENT™를 이용하였다. 유동해석을 위해 3차원 비압축성 Navier-Stokes 방정식 해법을 이용하였으며 계산은 모두 2차의 공간정확도 조건으로 하였다. 또한 계산시간을 고려하여 유동장을 모두 정상 (steady) 유동을 가정하였으며 계산시간 절감을 위하여 Fig. 2와 같이 입구부터 블레이드 앞전까지 그리고 블레이드 뒷전부터 출구까지의 경계면과 블레이드 윗면에 대해서는 대칭경계면 (symmetric boundary)을 이용하였다. 경계조건은 유입유동의 경우 속도를 고정하는 velocity inlet 조건을 사용하였고 유출유동의 경우 대기압과 동일한 pressure outlet 조건을 사용하였다. 입구 속도 ( $U_{in}$ )는 27 m/s에서 경계층의 두께 ( $\delta_{99}$ )는 36 mm, 난류강도 (turbulence intensity,  $Tu$ )는 0.2%이며 블레이드 두께 기준 레이놀즈수 (Reynolds number,  $R$

$Re_t$ )는  $1.15 \times 10^5$ 이다. 계산격자는 끝벽면에서의 첫 번째 격자거리 ( $y_1^+$ )를 3으로 블레이드 앞전 부근에서의  $y_1^+$  값은 8, 뒷전 부근에서는  $y_1^+$  값은 4가 되도록

록 하였다. 그리고 총 계산격자는 약 69만개이다.

난류모델로는 Yakhot and Orszag [5]의 RNG  $k-\epsilon$  모델을 사용하였으며 벽면처리 기법으로는 완전난류영역과 점성영향을 많이 받는 벽 근처의 영역으로 나누어 계산하는 enhanced wall function을 사용하였다.

## 2.2 해석모델

Figure 3과 같이 본 연구에서 설계한 형상은 Kubendran et al. [6], Eckerle and Langston [7] 등에 의해 밝혀진 말굽와류의 형성 과정에 그 근거를 두고 설계하였다. 연구된 말굽와류의 형성 과정에 의하면 블레이드 앞전에서 유동이 정체됨에 따라 블레이드 높이 방향으로의 정압력구배가 형성되며 이러한 높이 방향의 압력구배는 끝벽 방향으로의 유동을 생성하게 된다. 그리고 이 유동이 끝벽에 도달하여 상류(upstream)로 이동하게 되면 접근하는 상류 유동과 만나 와류를 형성하게 된다. 따라서 모서리 홈을 설치하여 블레이드 앞전 끝벽에서 상류로 향하는 유동의 강도를 약화시키면 말굽와류의 강도를 줄일 수 있다.

말굽와류의 발생 특성상 블레이드 앞전으로 접근하는 경계층에 의한 영향이 크므로 블레이드 앞전 모서리 홈을 설치 높이 및 크기를 경계층의 두께로 나누어 무차원화한 설치 높이 ( $l_{CH}/\delta_{99}$ ) 및 깊이 ( $l_{CD}/\delta_{99}$ )에 따라 경우를 분류하였으며 이에 따른 와류 감쇄 특성 및 구조에 대해 살펴보았다. 이를 위해 설치 높이가 1.00, 0.50, 0.25인 경우를 해석 모델 선택하였으며 깊이는 0.25, 0.50, 0.75 인 경우를 해석 모델로 선택하였다.

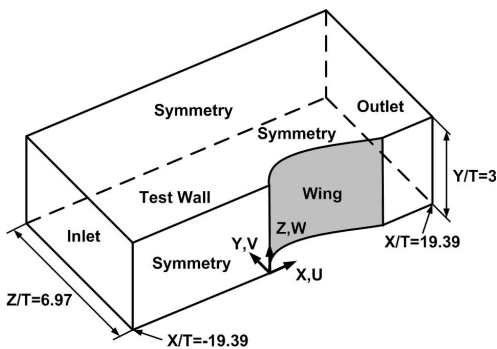


Fig. 2 Perspective View of a Wing-Body Junction

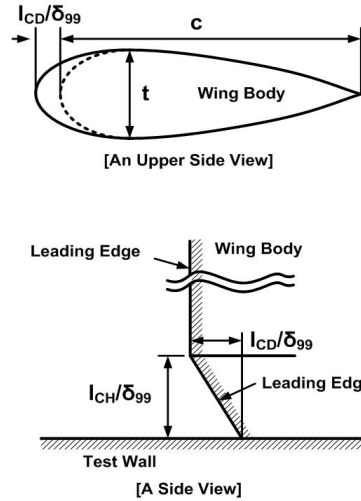


Fig. 3 Schematic Views of a Chamfer

## 3. 결과 및 고찰

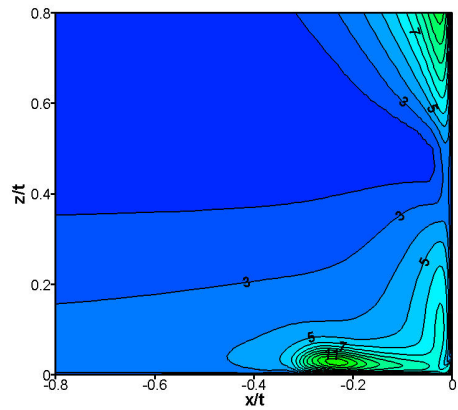
난류운동에너지 (turbulent kinetic energy)는 익렬 유로에서의 공기역학적 손실의 중요한 요인이다 [8]. 그리고 이러한 와류영역에서 나타나는 높은 난류운동에너지의 주요 원인은 와류의 비정상성 (unsteadiness) 때문이다 [9]. 따라서 각 경우에 대한 계산 결과를 Fig. 4(a)~(d), Fig. 5(a)~(c)와 같이 블레이드 앞전 부분에서 난류운동에너지를 입구속도 ( $U_{in}$ )의 제곱으로 나누어 무차원화한 값( $k/U_{in}^2$ )의 등고선도로 나타내었다.

### 3.1 설치 높이( $l_{CH}/\delta_{99}$ )에 따른 유동 특성

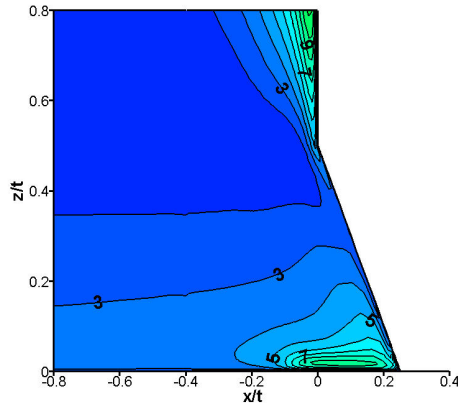
Figure 4(a)는 모서리 홈이 없을 때의 경우로  $x/t=0.22$ ,  $z/t=0.05$  지점에서 강한 말굽와류가 발생하는 것을 볼 수 있다. Fig. 4(b)의 경우, 모서리 홈의 설치로 인해 말굽와류 발생 영역에서의 난류운동에너지의 최고값이 no fence인 경우에 비해 33.5% 정도 감소하였고 그 영역 또한 감소한 것을 알 수 있다. 하지만 설치 높이가 너무 높아 말굽와류의 생성원인이 되는 블레이드 앞전 부분의 끝벽면으로 향하는 유동 (down flow)뿐만 아니라 후류로 흘러가는 유동까지 모서리 홈의 경사를 타고 끝벽면으로 흐르면서 말

말굽와류가 완전히 소멸되지 않는 것을 알 수 있다. Fig. 4(c)는 경계층 두께의 절반 높이로 모서리 홈을 설치한 경우이다. 앞선 경우처럼 후류로 흐르는 유동까지 모서리 홈의 경사를 따라 흐르지 않고 말굽와류의 생성에 주된 영향을 미치는 블레이드 앞전의 끝벽면 방향으로의 유동만이 흐름으로서 앞선 경우보다 난류운동에너지의 강도 및 영역이 줄어들은 것을 알 수 있다. 난류운동에너지의 최고값은 no fence인 경우에 비해 35.4% 감소하였다. 하지만 모서리 홈의 경사가 시작되는 곳에서의 급격한 형상변화로 이 부분에서 순환유동(circulation)에 의한 와류(vortex)가 발생하는 것을 알 수 있다. Fig. 4(d)는 경계층 두께의 1/4 높이로 모서리 홈을 설치한 경우이다. 난류운동에너지의 영역은 no fence인 경우에 비해 줄어들었지만 난류운동에너지의 최고값은 39.2% 증가하였다. 이것은 모서리 홈의 높이가 낮아지면서 모서리 홈의 경사가 급격해져 순환유동에 의한 강한 와류가 발생하기 때문이다.

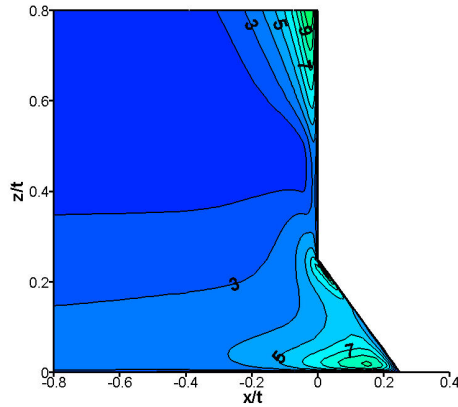
Table 1은 말굽와류가 발생하는 끝벽면 영역에서의 난류운동에너지와 전압력 손실계수의 최고값, 그리고  $x/t=-4.25$ 인  $yz$ 면에서의 질량유량 평균한 (mass weighted average) 전압력 손실계수값을 나타낸 그래프이며 % ch 값은 no fence인 경우에 대한 각 값들의 감소비율을 나타낸 것이다. Table 1에서 볼 수 있듯이 설치 높이 0.5인 모서리 홈이 좀 더 효과적으로 말굽와류의 발생 강도를 줄일 수 있으며 전압력 손실정도도 가장 좋은 것을 알 수 있다. 이것은 모서리 홈의 설치 높이가 너무 높으면 말굽와류의 발생에 큰 영향을 주지 않은 후류로 흘러가는 유동까지 모서리 홈으로 흘러 난류운동에너지의 감소를 방해하기 때문이며 설치 높이가 너무 낮으면 블레이드 익털 앞전의 급격한 형상변화에 의한 와류발생으로 난류운동에너지가 증가하기 때문이다. 따라서 적절한 높이의 모서리 홈이 설치되어야 좀 더 효율적으로 난류운동에너지를 줄일 수 있으며 말굽와류의 강도 역시 약화시킬 수 있다.



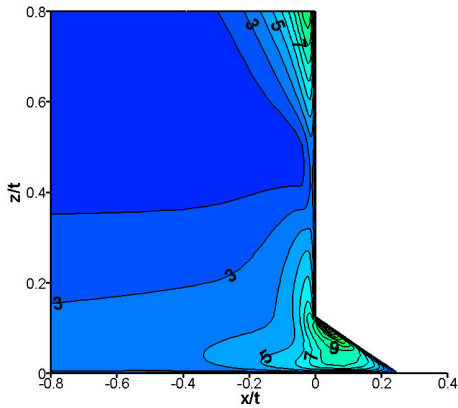
(a) No Fence



(b)  $I_{CH}/\delta_{99}=1.00, I_{CD}/\delta_{99}=0.50$



(c)  $I_{CH}/\delta_{99}=0.50, I_{CD}/\delta_{99}=0.50$



(d)  $l_{CH}/\delta_{99}=0.25, l_{CD}/\delta_{99}=0.50$

Fig. 4 Contours of a Normalized Turbulent Kinetic Energy, (1:0.0, 3:0.004, 5:0.008, 7:0.013, 9:0.017, 11:0.021, 13:0.025, 15:0.029, 17:0.033, 19:0.037, 21:0.042, 23:0.046, 25:0.050)

Table 1 Comparison of Aerodynamic Characteristics at Horseshoe Vortex Region

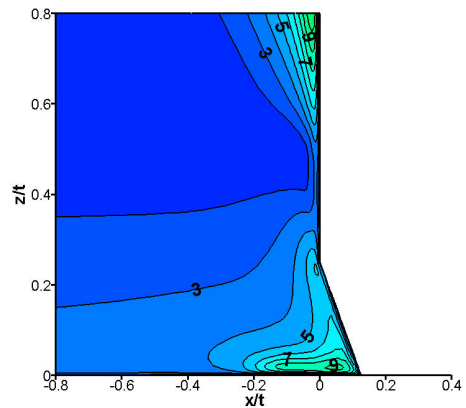
$l_{CH}/\delta_{99}$	$k/u_{in}^2$ peak	% ch	$C_{pt}$ $x/t=-4.25$	% ch
Baseline	0.0260	0.0	-0.11483	0.0
1.00	0.0173	-33.5	-0.11463	-0.18
0.50	0.0168	-35.4	-0.11305	-1.55
0.25	0.0362	39.2	-0.11468	-0.13

### 3.2 설치 깊이( $l_{CD}/\delta_{99}$ )에 따른 유동 특성

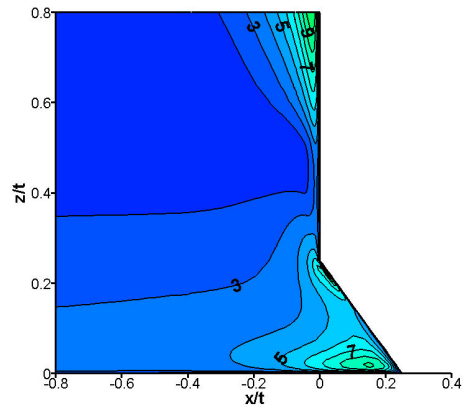
블레이드 앞전 모서리 홈의 설치 깊이에 따른 유동 특성에 대한 비교는 설치 높이에 따른 유동 특성 비교에서 가장 좋은 효과를 나타낸 설치 높이 0.5를 기준으로 설치 깊이를 0.25, 0.5, 0.75로 변화시켜가며 수행하였다.

Figure. 5(a)는 Fig. 4(c)와 같은 모서리 홈의 높이에 깊이를 경계층 두께의 1/4, Fig. 4(c)에 비해 반으로 줄인 경우이다. 홈의 깊이가 얕아짐에 따라 모서리 홈의 경사를 따라 흐르던 끝벽면에서의 유동이 끝벽면에서 다시 상류로 흐르면서 Fig. 4(c)보다 난류운동에너지의 강도와 영역이 증가한 것을 알 수 있다. 그럼에도 불구하고 no fence인

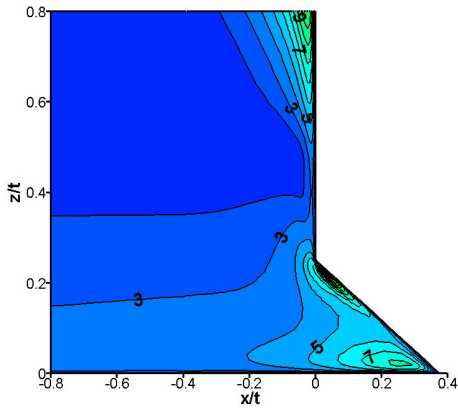
경우에 비해 끝벽면에서의 난류운동에너지의 최고값은 33.8% 정도 감소하였다. Fig. 5(b)는 설치된 모서리 홈의 깊이가 경계층 두께의 1/2인 경우로 Fig. 4(c)와 같은 경우이다. 모서리 홈의 깊이가 앞의 경우보다 깊어지면서 끝벽면에서 상류로 향하는 유동이 약해져 난류운동에너지의 강도가 약해진 것을 알 수 있다. Fig. 5(c)는 모서리 홈의 깊이가 경계층 두께의 3/4인 경우이다. 모서리 홈의 깊이가 더욱 깊어짐에 따라 끝벽면에서 상류로 향하는 유동이 더욱 약해졌으며 이에 따라 끝벽면에서의 난류운동에너지의 강도가 더 많이 감소하였다. 하지만 모서리 홈의 경사각이 앞선 경우보다 커지면서 순환유동에 의한 와류가 더 강하게 생기는 것을 알 수 있다.



(a)  $l_{CH}/\delta_{99}=0.50, l_{CD}/\delta_{99}=0.25$



(b)  $l_{CH}/\delta_{99}=0.50, l_{CD}/\delta_{99}=0.50$



(c)  $l_{CH}/\delta_{99}=0.50$ ,  $l_{CD}/\delta_{99}=0.75$

Fig. 5 Contours of a Normalized Turbulent Kinetic Energy, (1:0.0, 3:0.004, 5:0.008, 7:0.013, 9:0.017, 11:0.021, 13:0.025, 15:0.029, 17:0.033, 19:0.037, 21:0.042, 23:0.046, 25:0.050)

Table 2에서 볼 수 있듯이 모서리 홈의 깊이가 깊어질수록 끝벽면에서 발생하는 난류운동에서의 최고값이 줄어드는 것을 알 수 있다. 하지만 모서리 홈의 경사각이 커질수록 블레이드 앞전의 변곡점에서 강한 와류가 발생하므로 적절한 깊이의 모서리 홈을 설치하여야 최대의 효과를 볼 수 있을 것으로 생각된다.

Table 2 Comparison of Aerodynamic Characteristics at Horseshoe Vortex Region

$l_{CD}/\delta_{99}$	$k/u_{in}^2$ peak	% ch	$C_{pt}$ $x/t=-4.25$	% ch
Baseline	0.0260	0.0	-0.11483	0.0
0.25	0.0172	-33.8	-0.11341	-1.24
0.50	0.0168	-35.4	-0.11305	-1.55
0.75	0.0149	-42.7	-0.11474	-0.08

#### 4. 결 론

본 논문에서는 블레이드 앞전에 판을 설치하여 그 설치 높이 및 크기 등의 형상 변수를 변화시켜가면서 말굽와류의 발생 영역 및 강도의

감쇄 특성 및 구조에 대해 상용코드인 FLUENT<sup>TM</sup>를 이용하여 수치해석적인 방법으로 연구하였다.

모서리 홈의 설치 높이에 따른 유동해석을 통해 모서리 홈의 설치 높이가 너무 높으면 말굽 와류의 발생에 큰 영향을 주지 않은 후류로 흘러가는 유동까지 모서리 홈으로 흘러 난류운동 에너지의 감소를 방해하는 것을 알 수 있었으며 설치 높이가 너무 낮으면 블레이드 익렬 앞전의 급격한 형상변화에 의한 와류발생으로 난류운동 에너지가 증가하는 것을 알 수 있었다.

모서리 홈의 깊이에 따른 유동해석의 경우, 모서리 홈의 깊이가 깊어질수록 끝벽면에서 발생하는 난류운동에서의 최고값은 줄어들지만 모서리 홈의 경사각이 커질수록 블레이드 앞전의 변곡점에서 강한 와류가 발생하는 것을 알 수 있었다.

따라서 본 연구 비교 대상의 경우, 설치 높이 0.5, 깊이 0.5인 모서리 홈이 좀 더 효과적으로 난류운동에너지의 강도 및 영역을 줄일 수 있으며 전압력 손실정도도 가장 좋은 것을 알 수 있다. 또한 최적의 효율을 얻기 위해서는 적절한 높이와 깊이의 모서리 홈이 설치되어야 한다는 것을 알 수 있었다.

#### 후 기

이 논문은 2007년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임"(KRF-2007-612-D00084)

#### Nomenclature

$C_{pt}$	total pressure coefficient = $(P_t - P_{t.in})/0.5\rho U_{ref}^2$
t	wing-body thickness (m)
c	wing-body cord (m)
l	length (m)

$Re_t$  Reynolds number based on wing-body thickness and inlet bulk velocity =  $U_{in} \cdot t / \nu$   
 $Tu$  turbulence intensity =  $rms(\hat{u}) / (U_{in} \times 100)$   
 $U, V, W$  mean velocity components (m/s)  
 $x, y, z$  streamwise, normal to endwall, and spanwise directions  
 $y$  distance away from the wall  
 $\delta_{99}$  boundary layer thickness at the rate of  $U/U_{in}=0.99$   
 $k$  turbulent kinetic energy  
 $\rho$  density ( $kg/m^3$ )  
 $\nu$  kinetic viscosity ( $m^2/s$ )

Subscripts

$1$  first cell  
 $in$  inlet  
 $t$  total or stagnation  
 $CH, CD$  chamfer height, depth

Superscripts

$+$  non-dimensionalized wall quantity

Symposium Heat Transfer in Gas Turbine Systems, 2000.

3. S. Ölçmen and R. Simpson, An experimental study of a three-dimensional pressure-driven turbulent boundary layer. *Journal of Fluid Mechanics* 290, 1995, pp. 225-262.
4. S. Ölçmen and R. Simpson, Some features of a turbulent wing-body junction vortical flow. In: 35th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. AIAA Paper No. 97-0651, 1977.
5. V. Yakhot and S.A. Orszag, Renormalization Group Analysis of Turbulence. 1. Basic Theory, *J. Sci. Comput.*, Vol. 1, 1986, pp. 3-51.
6. L. R. Kubendran, A. Bar-Sever and W. D. Harvey, 'Flow Control in a Wing/Fuselage Type Juncture, AIAA Paper, AIAA-88-0614, 1988.
7. W. A. Eckerle and L. S. Langston, 'Horseshoe Vortex Formation Around a Cylinder, *ASME Journal of Turbomachinery.*, vol. 109, 1987, pp. 278-285.
8. D. G. Gregory-Smith, J. A. Walsh, C. P. Graves, and K. P. Fulton, Turbulence Measurement and Secondary Flows in a Turbine Rotor Cascade, *ASME J. Turbomach.*, Vol. 110, 1988, pp. 479-485.
9. R. Radomsky, and K. A. Thole, High Freestream Turbulence Effects in the Endwall Leading Edge Region, (ASME Paper 2000-6T-202), *ASME J. Turbomach.*, Vol. 124, 2002, pp. 107-118.

참 고 문 헌

1. O.P. Sharma, and T.L. Butler, Predictions of Endwall Losses and Secondary flows in Axial Flow Turbine Cascades. *ASME Journal of Turbomachinery*. Vol. 109, 1987, pp. 229-236.
2. L. S. Langston, Secondary Flows in Axial Turbines-A Review, *International*