

입구경계층 두께와 경계층 펜스가 터빈 캐스케이드내 열전달 특성에 미치는 영향

정지선* · 정진택**

Effects of the Inlet Boundary Layer Thickness and the Boundary Layer Fence on the Heat Transfer Characteristics in a Turbine Cascade

J. S. Jeong, J. T. Chung

Key Words: Turbine Cascade(터빈 캐스케이드), Boundary Layer Thickness(경계층 두께), Color Image Processing System(칼라 영상 처리 장치), Liquid Crystal(액정), Convective Heat Transfer Coefficient(대류 열전달 계수), Boundary Layer Fence(경계층 펜스)

Abstract

The objective of the present study is to investigate the effects of the various inlet boundary layer thickness on convective heat transfer distribution in a turbine cascade endwall and blade suction surface. In addition, the proper height of the boundary layer fences for various inlet boundary layer thickness were applied to turbine cascade endwall in order to reduce the secondary flow, and to verify its influence on the heat transfer process within the turbine cascade. Convective heat transfer distributions on the experimental regions were measured by the image processing system. The results show that heat transfer coefficients on the blade suction surface were increased with an augmentation of inlet boundary layer thickness. However, in a turbine cascade endwall, magnitude of heat transfer coefficients did not change with variation of inlet boundary layer thickness. The results also present that the boundary layer fence is effective in reducing heat transfer on the suction surface. On the other hand, in the endwall region, boundary layer fence brought about the subsidiary heat transfer increment.

기호설명

h : 대류 열전달 계수

H : 색상(Hue)

I : 명도(Intensity)

q' : 열유속(heat flux)

St : Stanton number

T_w : 액정 표면 온도

V : 입력 전압

1. 서 론

가스 터빈의 성능과 열효율을 향상시키기 위해서는 고온 고압의 가스에 견딜 수 있는 재질의 개발이 선행되어야 한다. 하지만 재료가 견딜 수 있는 온도에는 한계가 있기 때문에, 고효율의 가스 터빈을 설계하기 위해서는 열전달 현상에 대한 세밀한 고려와 함께 터빈 구성 요소간의 열적 구배에 대한 연구도 중요하다. 이러한 연구는 Graziani 등과⁽¹⁾ Goldstein 등에⁽²⁾ 의해서 수행되었으며, 이차 손실의 감소와 터빈부의 열전달 특성의 규명을 위한 연구가 Kawai, Chung⁽³⁾ 등에 의해서 이루어졌다. 공력 손실의 감소를 위해서 Kawai 등은 경계층 펜스를 제안함으로써, 약

* 고려대학교 대학원

** 고려대학교 기계공학과

20% 가량의 손실 감소를 얻을 수 있었다. Chung⁽³⁾ 등은 경계층 펜스를 사용하여 흡입면에서 삼각형 모양으로 나타나는 열적 구배가 큰 영역을 줄일 수 있음을 확인하였다. 이러한 공력 손실과 이차 유동에 영향을 미치는 인자로는 통로내에서 발생하는 2차 유동, 입구 경계층 두께, 비정상 후류, 난류강도, 블레이드 형상, 냉각 공기 유동 등이 있다.

본 연구에서는 다양한 입구 경계층 두께에 대한 캐스케이드내에서의 열전달 분포를 살펴보고, 이차 유동을 감소시켜 흡입면에서 열전달 감소의 효과를 얻을 수 있는 경계층 펜스를 각각의 경우에 적용함으로써 이의 효과를 살펴보았다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 블레이드 및 경계층 펜스

실험에 사용된 블레이드는 고효율 가스 터빈에 사용하는 블레이드를 모사하여 FRP 수지를 이용하여, 제작하였고 블레이드의 열전도 계수는 약 0.304 W/mK이고, 입구각은 -35°, 출구각 72.5°로 107.5°의 선회각을 갖도록 하였다. Table 1은 블레이드의 주요 형상에 대한 자료를 나타내고 있다. 경계층 펜스는 1.0mm 아크릴판을 캠버라인 형태로 제작하였다. 펜스의 위치와 길이는 통로 중앙부의 익현 길이로 제작하였으며, 펜스는 끝 벽에 접착제를 이용하여 고정하였다. Fig. 1은 개방형 풍동 내에 장착된 선형 캐스케이드 시험부의 개략도를 나타낸 그림이다.

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 (β_1)	-35°
Blade outlet angle (β_2)	72.5°
Turning angle	107.5°
Incidence angle	0°

본 실험에서는 주기성을 확보하기 위해서 끝벽에서의 정압분포를 측정하였으며, 유동 조절판을 이용하여 주기성을 조절하였다. 입구 경계층 두께 조건은 시험부 입구에 설치한 trip wire용 봉으

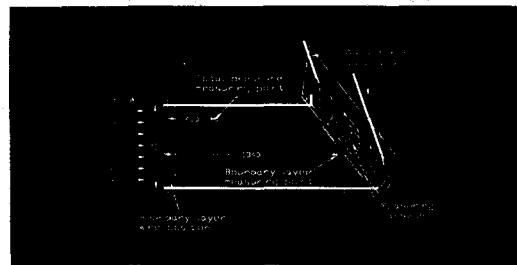


Fig. 1 Top view of the cascade test section.

로 조절하였다. 입구 경계층의 두께와 난류강도는 I형 열선유속계를 사용하여 측정했다.

2.2 액정을 이용한 열전달 현상의 측정 이론 및 측정 방법

본 실험에서는 열전달 계수의 측정을 위해서 온도에 따라서 색깔이 변하는 액정을 사용하였다. 액정은 필름이나 페인트의 형태로 상업화되어 있어 쉽게 구할 수 있으며, 실험하고자 하는 표면에 쉽게 부착될 수 있는 장점을 가지고 있지만, 인간의 색에 대한 감각을 이용하기 때문에 정성적인 측정에는 매우 유용하지만 정량적으로 정확한 온도를 계산하는 데는 비효율적이라고 볼 수 있다. 하지만 정확한 보정과 함께 정밀도가 높은 비디오 카메라나 CCD 카메라를 사용하여 영상을 보존하고 정확한 영상 처리 과정을 거친다면, 높은 신뢰성을 가진 자료를 얻을 수 있다. 본 실험에서는 이를 위해서 영상의 Hue 값과 온도와의 관계를 보정을 통해서 얻어내고, 얻어진 관계식을 이용하여 측정 평면의 온도를 얻는 방법을 사용하였다.

본 실험에서는 실온 30~35°C에서 색이 변하는 액정을 사용하였고, 컬러 영상 처리 장치를 이용했다. 먼저 CCD 카메라를 통해서 받아들여진 영상은 NTSC 형태로 영상 처리 board로 입력되어 진다. 이렇게 받아들여진 신호는 각각 pixel에 해당하는 Red, Green, Blue(0~255) 값이 버퍼에 저장되고 버퍼에 저장된 RGB 값은 “이중 6각원 추 HSI 컬러 모델”을 이용하여 색상(Hue), 체도(Saturation), 명도(Intensity) 값으로 변환할 수 있다. 이 중 온도와 선형 관계가 있는 Hue 값을 이용하여 Fig. 2와 같은 보정 장치를 통해서 온도와 Hue 값의 관계를 찾아낸다. 이러한 결과를

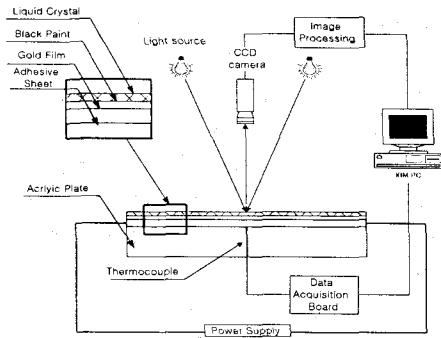


Fig. 2 Schematic of the Calibration, Data Acquisition and Processing System.

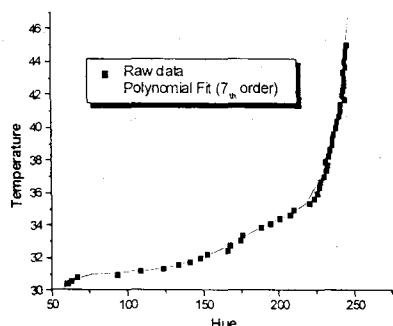


Fig. 3 Correlation of hue vs. temperature

바탕으로 Fig. 3과 같이 온도에 따른 Hue 값의 변화를 curve fitting을 통해서 식 (1)과 같은 보정 곡선을 얻어낸다.

$$\text{Temp.} = A + B_1 \times H + B_2 \times H^2 + B_3 \times H^3 + B_4 \times H^4 + B_5 \times H^5 + B_6 \times H^6 + B_7 \times H^7 \quad (1)$$

여기서, $A = -52.17811$

$$B_1 = 4.77898$$

$$B_2 = -0.11596$$

$$B_3 = 0.00154$$

$$B_4 = -1.19881 \times 10^{-5}$$

$$B_5 = 5.50149 \times 10^{-8}$$

$$B_6 = -1.372 \times 10^{-10}$$

$$B_7 = 1.43276 \times 10^{-13}$$

3. 실험 결과 및 고찰

본 실험에서 사용한 유동의 유입속도는 10m/s 이며 레이놀즈수(Re)는 1.5×10^5 이다. 입구 경계층 두께 조건은 Table 2와 같으며 이때의 난류강도는 case1~4는 0.6% 이내이며, case5는 0.7% 이내이다. 경계층 펜스의 높이는 각 입구 경계층 두께에 대해서 공력손실을 최소화할 수 있는 높이로 사용하였다. 즉 case1의 경우는 7mm 펜스를 사용하였고, 그 외의 case에 대해서는 12mm 펜스를 사용하였다.

Table 2 Inlet flow condition

	δ_{99}	δ^*	Θ	H
CASE 1	23	1.73	1.51	1.15
CASE 2	37	3.01	2.59	1.16
CASE 3	53	4.36	3.77	1.16
CASE 4	68	5.42	4.73	1.15
CASE 5	110	7.26	6.6	1.11

3.1 블레이드 흡입면과 캐스케이드 끝벽에서의 열전달 분포

캐스케이드내 흡입면과 끝벽에서의 국소열전달 계수는 Stanton number로 나타내었고, 다음과 같은 식으로 계산되었다.

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

$$St = \frac{h}{\rho_\infty C_p U_\infty} \quad (3)$$

여기서 q'' 는 단위 면적당 가열판에 가해진 열량으로 다음과 같이 계산된다.

$$q'' = \frac{V^2}{R_t \times A} \quad [W/m^2] \quad (4)$$

실험에서 얻은 결과에 대한 오차는 95%, 20:1 odds의 신뢰도에 근거하여 오차해석하였다. 본 실험에서 St 값의 불확실성은 4.02%로 나타났으며, 가장 큰 오차는 온도 측정에서 나타났다. 측정 평면은 Fig. 1에 표시한 바와 같이 통로 끝벽에서는 3번, 4번 블레이드 사이의 통로이며, 흡

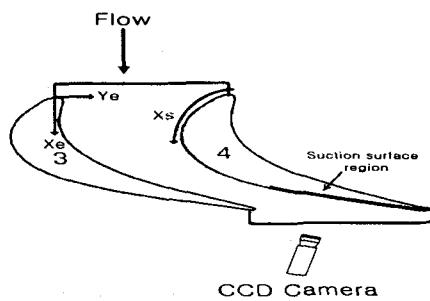


Fig. 4 Experimental regions and coordinate systems.

입면의 열전달 분포를 측정할 때는 4번 블레이드 흡입면에서 수행하였다. 측정 좌표계는 Fig. 3.1과 같다.

3.2 캐스케이드 흡입면에서 열전달 분포

3.2.1 펜스가 없는 경우

Fig. 5, 6은 펜스가 없는 경우, 경계층 두께에 따른 흡입면에서 Stanton number 분포이다. 펜스가 없을 경우 입구 경계층 두께에 상관없이 유동이 통로를 지나면서 뒷전으로 갈수록 높이 방향으로 증가하면서 경사지게 분포하는 경향을 볼 수 있다. 이는 통로에서 발달된 와류가 벽면을 쓸고 올라가는 움직임과 끝벽에서 발달한 횡단류에 의한 것으로 생각된다. 또한 경계층 두께가 두꺼워 질수록 이차유동의 강도가 강해지기 때문에 열적 구배가 큰 영역이 높은 위치에서 관찰된다. 경계층 두께가 가장 두꺼운 case5인 경우에는 나머지 조건과 전제적으로 비슷한 경향을 나타내지만 상대적으로 낮은 열전달 계수값이 넓은 영역에 걸쳐서 분포하는 것을 볼 수 있다. 이는 입구 경계층이 두꺼워서 블레이드 앞전에서 발생하는 말굽와류가 커지기는 하나 통로내에서 와도가 약해지고 이로써 통로와류가 약해지고 늦게 발달하기 때문이다. 이로써 횡단류가 통로내 이차유동의 주성분이 되기 때문에 이차유동의 영향을 많이 받는 흡입면에서 열전달 계수의 값이 다른 경우에 비해서 작다.

3.2.2 펜스를 설치한 경우

Figs. 7, 8은 각각의 경계층 두께에 대해서 공력손실을 가장 많이 줄일 수 있는 높이의 펜스를

설치했을 때 St number 값의 분포이다. Case1의 경우, 경계층 펜스를 적용함으로써 열적 구배가 큰 영역이 $X_s/C = 0.8$ 지점에서 Z_s/C 가 약 0.05~0.1 위치에서 0.04~0.08 위치로 낮아지게 되고, X_s/C 가 1.44 지점에서는 Z_s/C 가 약 0.08~0.28 위치에서 0.08~0.22 위치로 낮아지는 것을 관찰할 수 있다. 그리고 전체적으로 열전달 계수 값이 감소한 것을 확인할 수 있다. 이는 경계층 두께가 다른 나머지 case2~5에서도 공통적으로 관찰할 수 있다. 이를 통해서 모든 경우에 대해서 펜스를 설치함으로써 열전달 계수의 값이 감소하고 열전달 계수값의 구배가 큰 영역이 낮아지는 공통된 결과를 확인할 수 있었다. 이는 펜스에 의해서 횡단류가 차단되고, 또한 통로 와류의 성장이 억제되어 블레이드 흡입면에서 열전달이 줄어든 영향에 의한 것이다. 가장 두꺼운 경계층 두께인 case5인 경우에는 다른 case에 비해서 열전달 계수의 감소 효과가 거의 없었다. 입구 경계층 두께가 두꺼운 경우에는 통로와류가 제대로 발달하지 못하고 횡단류가 상대적으로 통로내 이차유동을 지배하기 때문에 펜스를 설치할 경우 횡단류의 영향이 줄어드는 끝벽 근처의 열전달 계수값은 줄어들게 된다. 하지만 span 방향으로의 열전달 계수 값은 거의 변화가 없다.

3.2.3 스팬 방향으로의 열전달 분포

Figs. 9, 10은 Case3인 경우에 대해서 $X_s/C = 1.2, 1.4$ 위치에서 fence를 사용했을 경우의 효과를 나타낸 그림이다. $X_s/C = 1.2, 1.4$ 위치에서 펜스의 효과가 크게 나타나지는 않지만, 통로를 통과하면서 발달하는 통로와류의 성장을 억제해주는 펜스를 사용함으로써 흡입면에서 열전달 감소 효과를 확인할 수 있다.

3.3 캐스케이드 끝벽에서 열전달 분포

3.3.1 펜스가 없는 경우

Fig. 11, 12는 3번과 4번 블레이드 사이의 통로 끝벽에서 열전달 분포를 나타낸 그림이다. 경계층이 가장 두꺼운 case5를 제외한 case1~4까지의 끝벽에서의 열전달 계수의 분포는 경계층 두께가 증가함에 따라 거의 변화 없지만, 열전달 계수의 값은 경계층 두께가 커질수록 증가한다. case1~4의 경우에는 앞전 근방에서 높은 열전달 계수가

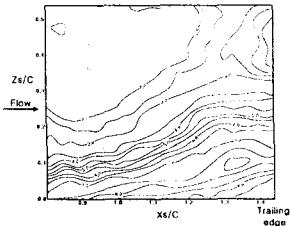


Fig. 5 $St \times 10^3$ distribution on the suction surface
(Case1 without Fence)

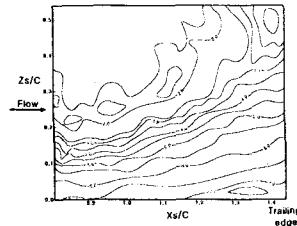


Fig. 6 $St \times 10^3$ distribution on the suction surface
(Case5 without Fence)

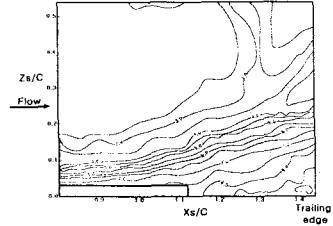


Fig. 7 $St \times 10^3$ distribution on the suction surface
(Case1 with Fence)

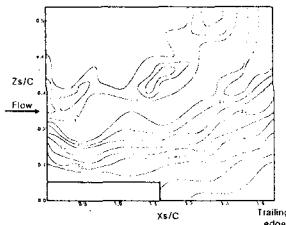


Fig. 8 $St \times 10^3$ distribution on the suction surface
(Case5 with Fence)

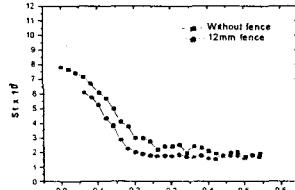


Fig. 9 Spanwise distribution of St on the suction surface
(at $Xs/C=1.2$, Case3)

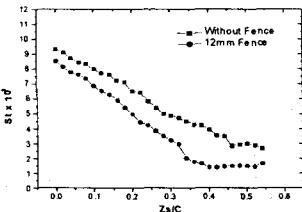


Fig. 10 Spanwise distribution of St on the suction surface
(at $Xs/C=1.4$, Case3)

나타나는 영역을 관찰할 수 있는데, 이는 앞전에서 발생하는 역압력 구배로 인한 말굽 와류의 생성과 그것에 의해 생기는 모서리 와류의 발달에 기인한 것이다. 이러한 활발한 유동에 의해서 블레이드 앞전에서는 급격한 열전달 구배를 관찰할 수 있다. 이 부분이 캐스케이드 통로 전반에 걸쳐 가장 높은 열전달 계수를 나타내는 영역이다. 또한, 4번 블레이드 앞전 부근에서 급격한 열전달 구배를 나타내는 영역을 관찰할 수 있다. 말굽 와류가 통로로 빨려들면서 압력면 성분과 흡입면 성분으로 갈라지게 되는데, 이중 말굽 와류의 흡입면 성분에 의한 영향 때문에, 4번 블레이드 앞전 흡입면에서의 재부착점까지 열전달 계수가 다른 부분보다 높게 나타난다. Case5를 제외한 모든 경우에 3번 블레이드의 압력면에서 흡입면으로 향하는 열전달 계수가 높은 부분을 관찰할 수 있다. 이는 블레이드 앞전에서 발생하는 말굽 와류의 압력면 성분이 통로를 통과하면서 회전 방향이 같은 통로 와류와 함께 발달하기 때문에 발생하는 것이다. 즉, 말굽 와류의 압력면 성분이 통로를 따라 진행하면서, 통로 내부의 곡률효과로 인한 횡압력 구배에 의해 발생하는 통

로 와류와 함께 합쳐진 뒤 그 크기와 강도가 강해지면서 강한 상승효과를 나타내서, 3차원 박리를 야기 시킨다. 이러한 3차원 박리에 의해서 다른 부분보다 높은 열전달 계수를 나타내는 영역이 발생하는 것이다. Case5의 경우 경계층 두께가 두꺼워서 말굽 와류의 크기는 크지만 와도는 약해서 말굽 와류의 압력면 성분이 통로를 통과하여도 주유동과 곡률효과에 의해서 발생하는 박리선이 나타나지 않는 것으로 여겨진다. 통로의 형상이 하류로 갈수록 좁아지는 노즐형상이기 때문에 하류 방향으로 진행하면서 주유동의 가속효과로 인하여 전체적인 열전달 계수가 커지는 형상을 확인할 수 있다.

3.3.2 펜스가 있는 경우

Figs. 13, 14는 경계층 펜스를 설치하였을 경우 끝벽에서의 열전달 분포를 나타낸 것이다. 펜스를 설치할 경우 통로전반에 걸쳐 끝벽에서 열전달 계수가 경계층 펜스가 없는 경우에 비해서 높은 열전달 계수를 나타낸다. 경계층 펜스가 통로전반에 걸쳐 위치하기 때문에 펜스가 없을 경우에 관찰할 수 있었던 열전달 계수가 높은 영역

4. 결 론

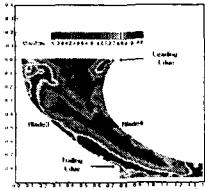


Fig. 11 $St \times 10^3$
contours on the
endwall
(Case2 w/o fence)

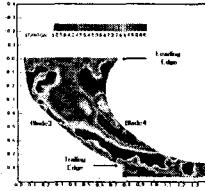


Fig. 12 $St \times 10^3$
contours on the
endwall
(Case5 w/o fence)

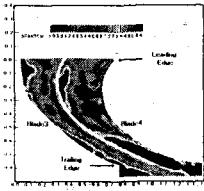


Fig. 13 $St \times 10^3$
contours on the
endwall
(Case2 with fence)

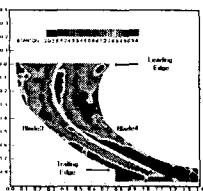


Fig. 14 $St \times 10^3$
contours on the
endwall
(Case5 with fence)

인, 박리선을 관찰할 수 없다. 이는 경계층 펜스에 의해서 말굽 와류의 압력면 성분과 통로 와류가 만나는 것이 차단되어서 서로 합쳐지면서 발생하는 강한 상승 작용이 없어서 관찰할 수 없는 것으로 생각된다. 펜스에 의해서 펜스와 4번 블레이드 사이 앞전 부근에서 높은 열전달 계수 영역을 볼 수 있다. 이는 펜스가 장애물 역할을 해서 유동의 펜스와 부딪히면서 발생하는 유동에 의해서 높은 열전달 계수가 나타나는 것으로 생각된다. 통로를 지나면서 경계층 펜스와 압력면, 흡입면 사이의 열전달 계수가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이는 유동이 통로를 지나면서 통로 와류의 발달과 수반해서 흡입면상에 나타나는 코너 와류의 영향과, 펜스에 의해서 발생하는 펜스 와류의 영향이 합쳐져서 압력면 보다는 더 큰 열전달 계수를 나타내는 것으로 생각된다.

(1) 블레이드 흡입면에서 입구 경계층 두께가 두꺼워 질수록 통로내에서 발생하는 통로 와류의 영향으로 발생하는 열적 구배가 큰 영역이 확장되고 높아지지만 그 값은 거의 변하지 않았다.

(2) 통로 끝벽에서 입구 경계층 두께가 두꺼워짐에 따라 끝벽에서의 열전달 분포는 거의 비슷한 경향을 나타냈지만 열전달 계수는 증가하였다. 또한, 앞전에서의 말굽 와류 발생으로 인한 심한 열적 구배가 나타나는 영역을 확인할 수 있었고, 박리선 근처에서의 활발한 열전달도 확인 할 수 있었다.

(3) 다양한 입구 경계층 두께에 대해 적절한 높이의 펜스를 설치하였을 때 모든 경우에 대해서 2차 유동의 성장 억제로 인해 블레이드 흡입면에서 열전달 감소 효과와 열적 구배가 급격한 영역이 감소하는 효과를 얻을 수 있었다.

(4) 경계층 펜스를 설치하였을 경우, 통로 끝벽에서는 다양한 입구 경계층 두께에 대해 펜스에 의한 영향에 의해서 발생하는 부수적인 유동에 의해서 열전달 계수가 증가하였으나, 그 증가량은 흡입면에서의 변화에 비해 상대적으로 미미하다.

참고문헌

- (1) Granziani, R. A., Blair, M. F., Taylor, J. R., Mayle, R. E., 1980, "An Experimental Study of Endwall and Airfoil Surface Heat Transfer in a Large Scale Turbine Blade Cascade," Transaction of ASME, Journal of Engineering for Power, Vol. 102, pp. 257~267.
- (2) Goldstein, R. J., Karni, J., May 1984, "The Effect of a Wall Boundary Layer on Local Mass Transfer From a Cylinder in Crossflow," Transactions of the ASME, Journal of Heat Transfer, Vol. 106, pp. 260~267.
- (3) 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.