

곡면 끝벽을 갖는 터빈 노즐 안내깃 캐스케이드내 3차원 유동장에 관한 실험적 연구

윤원남[†], 정진택^{*}

Experimental Study on Effects 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(곡면 끝벽), Suction Surface(흡입면), Cross Flow(횡단류)

Abstract

The three-dimensional flow in a turbine nozzle guide vane passage causes large secondary loss through the passage and increased heat transfer on the blade surface. In order to reduce or control these secondary flows, a linear cascade with a contoured endwall configuration was used and changes in the three-dimensional flow field were analyzed and discussed. Measurements of secondary flow velocity and total pressure loss within the passage have been performed by means of five-hole probes. The investigation was carried out at fixed exit Reynolds number of 4.0×10^5 . The objective of this study is to document the development of the three-dimensional flow in a turbine nozzle guide vane cascade with modified endwall. The results show that the development of passage vortex and cross flow in the cascade composed of one flat and one contoured endwalls are affected by the flow acceleration which occurs in contoured endwall side. The overall loss is reduced near the flat endwall rather than contoured endwall.

기호설명

CR : Contraction ratio
 H_2 : Exit span of the blade
 C_{p_t} : Total pressure loss coefficient

1. 서론

가스터빈의 터빈 스테이지 내에는 말굽와류, 통로와류, 횡단류 등 복잡한 3차원 유동이 발생

하게 된다. 주유동 방향에 수직인 평면에 발생하는 이차유동은 터빈에 추가적인 공력손실을 야기시키고, 끝벽과 흡입면에 열응력이 집중되는 영역을 생성하게 된다. Langston 등¹⁾은 터빈 캐스케이드 내의 3차원 유동의 특성에 관한 연구를 수행하여 압력면 말굽와류가 통로 내부에서 생성되는 통로와류와 함께 보다 강한 와류로 발전하게 된다고 하였으며, Yamamoto²⁾는 터빈 캐스케이드 내에서 일어나는 대부분의 손실은 통로와류와 블레이드 흡입면과의 상호 작용에 의해서 발생한다고 하였다. 가스터빈의 성능과 신뢰성 향상을 위하여 이러한 이차유동을 조절하여 이차손실을 감소시킬 수 있는 다양한 방법들이 연구되었는데, 그 중의 하나로 끝벽의 형상을 변화시키는 방법이 있다. 끝벽의 형상을 변화시키는 연구들은 주

[†] 고려대학교 대학원

^{*} 고려대학교 기계공학과

E-mail : jchung@korea.ac.kr

TEL : (02)3290-3364

로 노즐 안내깃에서 이루어졌으며, 이는 블레이드 곡률이 작은 노즐 안내깃에서의 유동이 캐스케이드 통로를 지나면서 상대적으로 블레이드 곡률이 큰 정익과 동익에 비해서 끝벽의 형상 변화에 의해 더 큰 가속력을 갖기 때문이다. Deich 등³⁾은 끝벽의 형상 변화를 통하여 공력손실을 감소시킬 수 있음을 보였고, Koppe 등⁴⁾은 곡면 끝벽(Contoured endwall)의 경우에 일반적인 평면 끝벽(Planar endwall) 보다 이차손실이 크게 감소함을 확인하였다. 또한, Morris와 Hoare⁵⁾는 서로 다른 형태의 곡면 끝벽의 비교를 통해 3차원 곡선 형태가 이차손실 감소에 효과적이며, Moustapha와 Williamson⁶⁾은 곡면의 형상이 다른 두개의 곡면 끝벽의 비교를 통해 급격한 경사를 갖는 경우가 더 효과적임을 각각 제시하였다. 앞의 연구들이 모두 노즐 안내깃에서 수행된 것인 반면에, 정익 캐스케이드에서 곡면 끝벽의 연구는 Boyle과 Haas⁷⁾에 의해 수행되었으며, 전산해석을 통해 Timko⁸⁾, Tipton⁹⁾ 등의 실험값과 그 결과를 비교하였다. 또한 Kim¹⁰⁾은 Lee¹¹⁾의 연구로부터 전산해석을 통해 곡면 끝벽을 적용하여 그 결과를 비교하였으나, 이들의 연구로부터 정익 캐스케이드에서는 끝벽의 형상을 변화시켰을 때 그 효과가 작거나 오히려 손실이 증가함을 밝혔다. 이처럼 곡면 끝벽의 곡면 형상에 관한 선행 연구를 통해서, 3차원 곡선 형태로써 급격한 경사를 갖는 곡면 끝벽 형태의 경우가 손실 감소에 효과적임이 밝혀졌다. 그러나 선행 연구들은 대부분 캐스케이드 하류 영역에서의 손실 비교를 통해 일반적인 평면 끝벽 캐스케이드와 비교하여 곡면 끝벽을 설치한 경우 손실이 감소함을 나타내었지만, 손실 감소의 원인을 규명하지는 못하였다. 이에 본 연구의 목적은 곡면 끝벽과 일반적인 평면 끝벽 노즐 안내깃 캐스케이드 내에서의 3차원 유동을 비교함으로써 통로와류를 포함한 이차유동의 발달 과정과 손실 영역이 곡면 끝벽에 의해 어떻게 영향을 받는지를 고찰하려는 것이다.

2. 실험 장치 및 방법

실험에 사용된 곡면 끝벽은 Fig. 1(a)의 평면 끝벽과 Fig. 1(b)에서 보는 것과 같이 아래 끝벽이 오목 볼록의 3차원 곡선 형태를 갖는 곡면 끝

벽이며 출구 높이를 기준으로 0.17의 수축율을 갖도록 제작되었다. 수축율 CR은 다음 식으로 정의하였다.

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

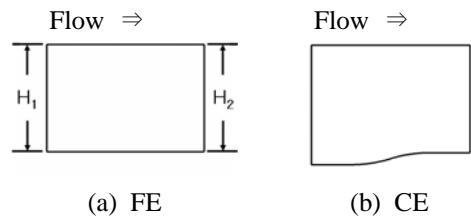


Fig. 1 Contoured endwall configuration

Fig. 2는 소형 아음속 개방형 풍동에 장착된 선행 캐스케이드 시험부로서, 5개의 블레이드 사양은 Table 1과 같다.

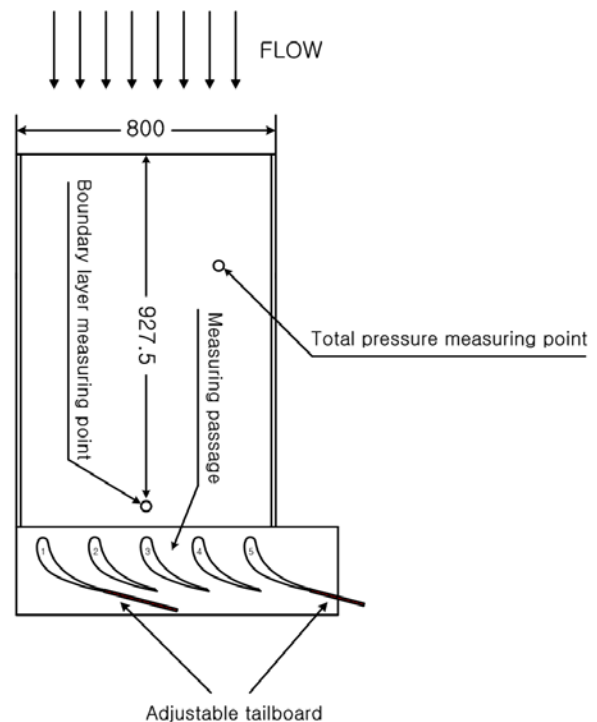


Fig. 2 Top view of the cascade test section

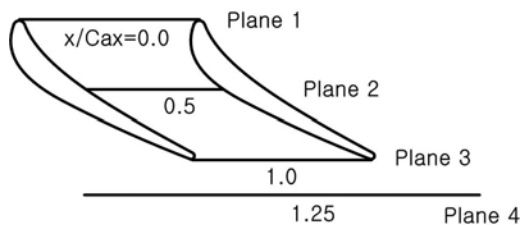
본 실험에서는 주기성을 확보하기 위하여 미드스팬에서의 속도 분포와 끝벽에서의 정압분포를 측정하였으며 유동 조절판을 이용하여 주기성을 확보하였다. 또한 경계층 두께와 난류강도는 I형

Table 1 Geometry of the blade

Chord (C)	230 mm
Exit height (H_2)	150 mm
Axial chord to chord ratio (C_{ax}/C)	0.63
Aspect ratio (H_2/C)	0.65
Solidity (C/S)	1.21
Blade inlet angle (β_1)	0°
Blade outlet angle (β_2)	50.3°
Exit Reynolds No.	4.0×10^5

열선 유속계를 사용하여 측정하였으며, 3차원 유동 측정은 원추형 및 프리즘형 5공 프로브와 PSI사의 9000 series 압력장치를 이용하였다.

Fig. 3은 측정평면을 도시한 것이며, 노즐 안내깃 캐스케이드 내부유동을 측정하기 위해 비축거리를 기준으로 $x/C_{ax}=0, 0.5, 1.0$ 의 3개 평면과, 외부유동 및 전체 압력 손실을 측정하기 위해 $x/C_{ax}=1.25$ 의 1개 평면에서 각각 3차원 유동을 측정하였다.

**Fig. 3** Top view of measuring planes

3. 실험 결과 및 고찰

가스터빈에서 노즐 안내깃의 역할 중 하나는 연소기로부터의 불안정한 유동이 안내깃을 지나면서 어느 정도 제어됨으로써 터빈 스테이지 1단인 동익으로 유입되는 유동의 조건을 개선하는 것이다. 따라서 노즐 안내깃의 입구 조건보다 출구 조건이 중요한 고찰 대상이 된다. 본 실험에서는 출구 조건을 동일하게 하기 위해 출구의 높이와 레이놀즈수를 동일하게 하였으며 적용된 출구 레이놀즈수(Re_2)는 4×10^5 이다. 또한 입구 자유유동장의 난류강도는 0.7% 이내이며, 균일도는 벽면 경계층 부분을 제외한 영역에서 0.3% 이내이다.

3.1 이차유동 속도 분포

캐스케이드 통로에서의 이차유동을 비교하기 위하여 총 3개의 평면에 대해 측정된 3차원 유동의 형상을 이차유동 속도 분포로 나타내었다.

Figs. 4~6은 평면 1~3에서 측정된 이차유동 속도 분포이며 (a)는 평면 끝벽으로 구성된 일반적인 캐스케이드이고, (b)는 한쪽 면에 곡면 끝벽을 적용시킨 캐스케이드를 나타내었다. Fig. 4는 평면 1에서 측정된 이차유동 속도 분포로써 이차유동의 발달이 거의 없고 끝벽 부근의 약한 횡단류만 관찰된다. Fig. 5는 평면 2에서 측정된 이차유동 속도 분포이다. 평면 2는 끝벽의 곡면이 적용된 부분으로써 이차유동 속도 분포에도 큰 변화를 보여주고 있다. Fig. 5(a)에서는 블레이드 앞전에서 발생한 말굽와류가 통로와류로 발전하고 있으며 끝벽상의 횡단류에 의해 흡입면 쪽으로 이동하고 있다. 그러나 Fig. 5(b)에서는 곡면 끝벽으로 인한 유동장의 변화를 볼 수 있으며, 특히 끝벽 곡률에 의해 유로 면적이 급격하게 수축됨에 따라 곡면 끝벽 부근의 유동이 빠르게 가속되면서 횡단류의 영향을 적게 받는 것으로 확인된다. 또한 흡입면 부근에서는 z축 속도가 크게 증가하였다. 이는 곡면 끝벽에 의해 통로와류가 stretching되면서 와류의 크기가 작아지는 반면 세기가 강해진 것과, 곡면 끝벽에 의해 상승하는 유동이 흡입면 상승류와 결합하여 강한 상승류가 발생한 것이라 할 수 있다. 반면 위쪽의 평면 끝벽 부분은 통로와류의 발달이 미미하였다. Fig. 6은 평면 3에서 측정된 이차유동 속도 분포이며, Fig. 6(a)에서는 흡입면 쪽으로 완전히 발달된 통로와류의 형상이 관찰된다. 한편 Fig. 6(b)의 곡면 끝벽 부근의 통로와류도 흡입면 쪽으로 이동하여 발달하였지만 와류의 중심이 끝벽 쪽으로 더욱 밀착되었다. 그리고 반대편 평면 끝벽 부분은 흡입면 쪽으로 이동한 통로와류의 이차유동 세기가 약간 증가하였을 뿐 큰 변화가 없다.

이상의 결과를 통해서, 곡면 끝벽이 적용된 부분에서는 곡면 끝벽에 의해 와류의 세기는 증가하였지만 크기가 작아지고, 통로의 급격한 수축으로 가속된 주유동이 횡단류의 영향을 적게 받아 통로와류로의 발달이 억제되는 것으로 해석된다. 반대편 평면 끝벽 부분에서는 통로와류의 발달이 완화되었고, 일반적인 노즐 캐스케이드내의 유동에 비해 이차유동이 크게 감소하였다.

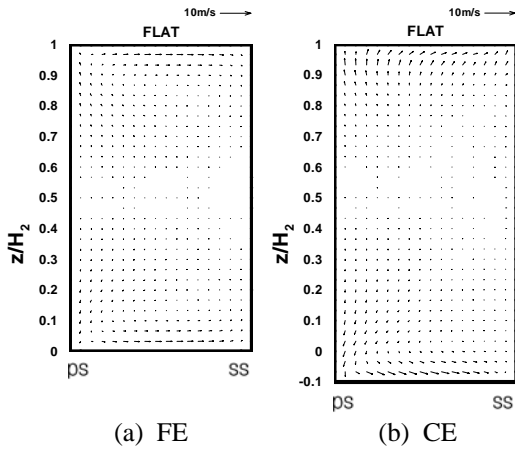


Fig. 4 Vector plot of secondary velocities at plane 1

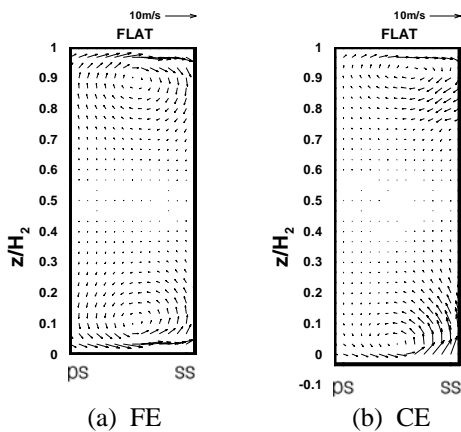


Fig. 5 Vector plot of secondary velocities at plane 2

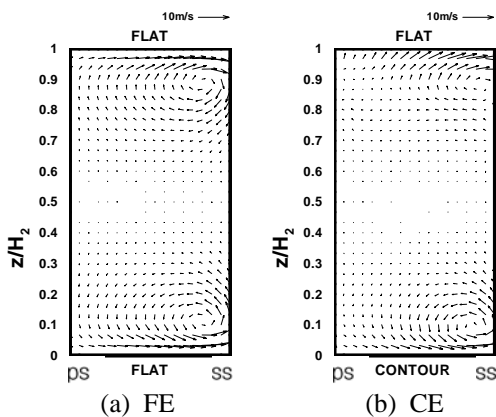


Fig. 6 Vector plot of secondary velocities at plane 3

3.2 전압 손실 분포

전압 손실 계수에 대한 정의는 식 (2)와 같으며, 여기서 P_{t0} 는 입구에서의 전압이고, 각 지점에서의 전압과의 차이를 자유유동 속도 수두로 무차원화 하여 계산하였다.

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

Figs. 7~9는 평면 1~3에서 측정된 전압 손실 분포이며 (a)와 (b)는 평면 끝벽과 곡면 끝벽을 각각 적용한 경우이다.

Fig. 7에서 보는 바와 같이 평면 1에서는 이차유동이 아직 발달되기 전이므로 각각의 경우에 손실 영역이 전형적인 경계층 유동 손실의 형태를 나타내면서 캐스케이드 끝벽 경계층 내에 나란하게 피치 방향으로 분포되어 있음을 알 수 있다. 그러나 Fig. 7(b)의 곡면 끝벽을 설치한 경우는, 반대편 평면 끝벽 부분에서 약간의 손실 감소가 나타나며 이는 곡면 끝벽이 노즐 캐스케이드 입구 유동에 영향을 주는 것이며 이차유동 감소의 원인이라 할 수 있다. Fig. 8은 평면 2에서 측정된 전압 손실 분포이며, Fig. 8(a)에 비해 Fig. 8(b)에서는 곡면 끝벽 부근에서 손실 영역의 감소를 확인할 수 있으며, 이는 곡면 끝벽에 의해 유로 면적이 급격히 줄어들면서 발생하는 강한 가속력에 의해 축방향 속도가 증가하게 되며 이로 인해 이차손실 영역이 감소하는 것이라 할 수 있다. Fig. 9는 평면 3에서 측정된 전압 손실 분포이다. 일반적인 노즐 캐스케이드에 비해서 Fig. 9(b)의 곡면 끝벽이 설치된 노즐 캐스케이드인 경우 전체적으로 손실 영역이 감소되었으며, 곡면 끝벽 부분은 평면 2를 지나면서 와류가 stretching 되는 영향으로 와류의 세기가 증가하는 반면 손실 영역은 감소하였고 평면 끝벽 부분은 손실 영역의 감소가 두드러지게 나타나는 것이 특징이다.

이러한 결과는 곡면 끝벽의 설치가 와류의 세기를 증가시키지만 손실 영역의 감소를 가져오며, 또한 곡면 끝벽에서 발생하는 가속의 영향으로 위쪽 평면 끝벽 부근의 횡방향 압력분포가 완화되어 통로와류의 발달이 억제되는 것이라 할 수 있다.

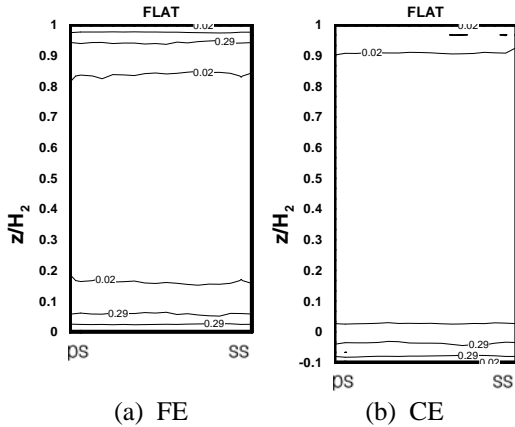


Fig. 7 Contour plot of total pressure loss coefficient at plane 1

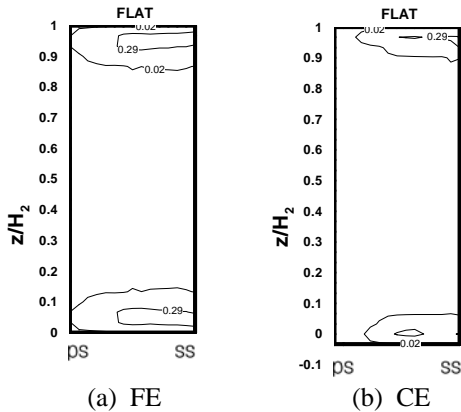


Fig. 8 Contour plot of total pressure loss coefficient at plane 2

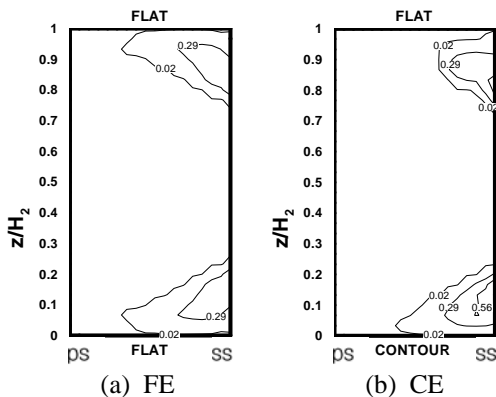


Fig. 9 Contour plot of total pressure loss coefficient at plane 3

3.3 후류 유동장

곡면 끝벽의 효과를 정량적으로 보기 위하여 후류 영역인 4번 평면에서의 전체 압력 손실 계

Table 2 Overall loss coefficients at the wake region

	Contour side (0~50%)	Flat side (50~100%)	Overall (0~100%)
FE	0.42807	0.42807	0.42807
CE	0.43528	0.34067	0.38797

수를 비교해 보았으며, 다음의 식 (3)으로 정의하였다.

$$\overline{Cp_t} = \frac{\sum_i \sum_j (Cp_t u dA)_{ij}}{\sum_i \sum_j (u dA)_{ij}} \quad (3)$$

전체 압력 손실 계수는 곡면 끝벽의 효과를 비교하기 위하여 미드스팬을 기준으로 아래쪽 영역인 Contour side, 위쪽 영역인 Flat side로 나누어 계산하였으며, 그 결과는 Table 2에 나타내었다. 일반적인 노즐 캐스케이드와 곡면 끝벽이 설치된 노즐 캐스케이드의 비교를 통해 곡면 끝벽이 설치된 노즐 캐스케이드의 경우에는 Contour side에서는 손실값이 증가한 반면 Flat side에서는 손실이 크게 감소하였기 때문에 평면 전체 압력 손실에서는 9.4% 라는 커다란 손실 감소가 나타났다. 이는 기존 연구⁴⁾에서 보듯이 전형적인 곡면 끝벽이 적용된 노즐 캐스케이드에서 나타나는 손실 감소 효과를 보여주는 것이며, 본 실험에 적용된 곡면 끝벽의 조건이 손실 감소에 효과가 있음을 입증하는 것이다. 그러므로 통로 내부유동을 고찰하는데 있어서 앞의 결과들에 대한 타당성을 입증하는 것이기도 하다.

4. 결 론

- 1) 일반적인 평면 끝벽으로 구성된 노즐 캐스케이드와 비교하여 한쪽 곡면 끝벽의 노즐 캐스케이드에서는 곡면 끝벽 부근 보다 평면 끝벽 부근의 이차 유동 및 전압 손실이 감소하였다.
- 2) 곡면 끝벽의 설치는 통로 내부의 횡방향 및 종방향 압력구배를 변화시키며, 통로의 급격한 수축의 영향으로 곡면 끝벽 부근의 유동은 빠르

게 가속된다.

3) 곡면 끝벽을 지나는 통로와류는 곡면 끝벽의 수축에 의한 통로 내부유동의 가속 및 와류의 stretching으로 크기는 작아지며 강도가 세지는 특징을 갖는다.

4) 곡면 끝벽의 급격한 수축으로 인해 끝벽의 곡률이 진행되는 부분에서 강한 가속이 일어나며 축방향 속도가 증가하고 곡면 끝벽 부근의 가속에 의해 평면 끝벽 부근에서는 압력 구배가 완화되고 통로와류의 발달이 둔화되어 평면 끝벽 부근의 손실 저감을 가져왔다.

5) 후류영역에서 평면 전체 압력 손실의 계산 결과, 일반적인 노즐 캐스케이드에 비해 한쪽 곡면 끝벽의 노즐 캐스케이드에서 평면 전체 압력 손실이 9.4% 감소하였다.

후 기

본 연구는 고려대학교 특별연구비에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Langston, L. S., "Some Aspect of the Three-Dimensional Flow in Axial Turbine Cascade," pp. 35~57.
- (2) Yamamoto, A., 1987, "Production and Development of Secondary Flows and Losses in Two Types of Straight Turbine Cascades: Part 1-A Stator Case," Transactions of the ASME, Journal of Turbomachinery, Vol. 109, pp. 186~193.
- (3) 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.
- (4) Kopper, F. C., Milano, R., and Vanco, M., 1981, "Experimental Investigation of endwall Profiling in a Turbine Blade Cascade," AIAA Journal, Vol. 19, No. 8, pp. 1033~1040.
- (5) Morris, A. W., and Hoare, R. G., 1975, "Secondary Loss Measurements in a Cascade of

Turbine Blades With Meridional Wall Profiling," ASME Paper, 75-WA/GT-13.

- (6) Moustapha, 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.
- (7) Boyle, R. J., and Haas, J. E., 1982, "Comparison of Experimental and Analytical Performance for Contoured endwall Stators," AIAA Paper, 82-1286.
- (8) Timko, L. P., 1982, "Energy Efficient Engine : High pressure Turbine Component Test Performance Report," NASA CR-168289.
- (9) Tipton, D. L., 1981, "Experimental Investigation of Turbine endwall Contouring," Detroit Diesel Allison Report AX0400 174, General Motors corp., AVRADCOM Tech. Report 81-D-19.
- (10) Kim, D. Y., 2002, "Numerical Analysis on Effects of the Contoured Endwall on the Three-dimensional Flow Characteristics in a Turbine Cascade," Master Thesis, Dept. of mechanical engineering, Korea Univ., Seoul, Korea.
- (11) Lee, Y. J., 1996, "Experimental Study on Effects of the Boundary Layer Fence on the Three-dimensional Flow in Gas Turbines," Master Thesis, Dept. of mechanical engineering, Korea Univ., Seoul, Korea.