

블레이드 팁 형상이 터빈 캐스케이드 전압 손실에 미치는 영향에 대한 연구

이기선* · 박승덕* · 노영철* · 김학봉** · 곽재수**† · 전용민***

Effect of Turbine Blade tip shape on the Total Pressure Loss of a Turbine Cascade

Ki Seon Lee*, Seoung Duck Park*, Young Chul Noh*, Hark-Bong Kim**,
Jae Su Kwak**† and Yongmin Jun***

Key Words : Tip leakage flow(팁 누설유동), Secondary flow(이차 유동), 5-hole probe(5공 프로브), Squealer tip(스컬러 팁)

ABSTRACT

Leakage flow through turbine blade tip gap causes strong leakage vortex near the blade suction side and induces large aerodynamic losses. In this study, the conventional plane tip and various squealer tip blades were tested in a linear cascade in order to measure the effect of the tip shape on the total pressure loss. Three tip gap clearances of 0.6%, 1.3%, and 2.0% of blade span were tested. Flow measurement was conducted at one chord downstream from the trailing edge with a five-hole probe. Results showed that the leakage vortex was stronger than passage vortex and the mass averaged overall total pressure loss through the cascade was the lowest for suction side blade tip case. For all tested cases, the area averaged overall total pressure loss was increased as the tip clearance increased.

1. 서론

회전하는 터빈 블레이드의 팁과 슈라우드 사이의 간극에서는 압력면과 흡입면의 압력차이로 인해 팁 누설유동이 발생한다. 이러한 팁 누설유동은 팁 표면에 얇은 경계층과 박리, 재부착을 야기하여 높고 불균일한 열전달 계수 영역을 형성하고, 이러한 불균일한 열부하는 블레이드 팁 영역에 열응력을 발생시켜 블레이드의 수명을 단축시킨다. 또한 팁 누설유동은 흡입면에서 누설와류(leakage vortex)를 형성하여 전압손실과

팁 근처 흡입면에 높은 열전달 계수를 야기한다. 이러한 팁 누설유동과 누설와류에 의한 열부하와 전압손실을 줄이기 위해 많은 연구자들에 의하여 연구가 수행되었다.

Wei 등⁽¹⁾은 팁 간극의 크기를 변경하며 실험을 수행하였고, 이때 전압 손실이 출구 마하속도에 정비례하여 증가하는 현상을 관찰하였다. Ma 와 Jiang⁽²⁾은 압축기 팁에서의 정압 분포 측정을 통해 누설유동에 의한 유동현상을 관찰하였으며, 누설와류가 앞전 부근에서부터 발달하는 과정을 보였다. 또한 앞전의 팁 부근에서 발생하는 말굽와류 등의 이차 유동이 유동 저항으로 작용하는 것을 보였다. Schabowski와 Hodson⁽³⁾은 전산유체역학을 이용하여 다양한 형상의 스컬러(squealer)와 윙렛(winglet)이 팁 누설 손실에 미치는

* 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과 대학원

** 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과

† 교신저자, E-mail : jskwak@kau.ac.kr

*** 한국항공우주연구원 KHP 개발실

영향에 대하여 연구하였으며, 팁 형상의 변화로 평면 팁에 비해 20% 이상의 압력손실 감소 효과를 얻을 수 있음을 보였다. Prakash 등⁽⁴⁾은 전산유체역학을 이용하여 수직으로 설치된 압력면의 스퀸러 팁과 압력면 방향으로 경사진 압력면의 스퀸러 팁을 비교하였다. 그 결과, 경사진 스퀸러 팁의 전압손실이 가장 적었으며, 수직으로 설치된 스퀸러 팁은 평면 팁보다 오히려 성능이 저하 되는 것을 확인하였다. Behr 등⁽⁵⁾은 케이싱을 통하여 팁에 냉각 유체를 주입해 줌으로써 팁 누설 손실을 줄이는 방법에 대해서 연구하였으며, 냉각 유체 주입 시 팁 누설과 팁 누설와류의 크기가 감소하는 것을 확인하였다. 하지만 냉각 유체의 분사는 터빈의 성능을 감소시킬 수 있다는 것을 보였다. Dey와 Camci⁽⁶⁾는 블레이드 팁 압력면과 흡입면에 각각 확장면 설치하여 이차 유동과 압력손실을 측정하였다. 흡입면에 설치된 확장면은 누설와류의 중심을 이동시켜 흡입면으로부터 더욱 멀리 떨어뜨렸으며, 압력손실은 전혀 줄지 않았다. 반면에 압력면에 설치된 확장면은 팁 간극으로 유입되는 유동을 줄여 누설와류의 크기를 감소시켰다. Lee 와 Chae⁽⁷⁾는 스퀸러 팁의 림 높이에 따른 이차 유동과 압력손실의 변화에 대한 연구를 실시하였으며, 홈의 깊이가 깊을수록 팁 누설유동에 의한 유동 손실이 감소하는 것을 확인하였다. Kwak 등⁽⁸⁾은 다양한 형상과 높이의 스퀸러 림이 설치된 블레이드 팁과 평면 팁에 대한 열전달 특성 연구를 수행하였다. 평면 팁에 비해 스퀸러 림을 설치한 경우의 팁 열전달 계수가 낮았으며, 블레이드의 흡입면 팁에 림을 설치한 경우가 다른 형상들에 비해 더욱 낮은 열전달 계수 값을 나타내는 것을 보였다.

본 논문에서는 Kwak 등⁽⁸⁾이 수행한 다양한 팁 형상에 대한 열전달 연구 중 대표적인 팁 형상에 대해 전압 손실 계수를 측정하여 열전달 계수 감소 효과가 좋은 팁 형상이 전압 손실 계수의 감소에도 효과가 있는지에 대한 연구를 수행하였다. 이를 위해 5공 프로브를 이용하여 블레이드 하류에서 팁 형상과 간극의 변화가 이차 유동과 전압 손실에 미치는 영향을 실험적으로 연구하였다.

2. 실험 장치의 구성

Fig. 1은 캐스케이드의 개략도를 나타낸 것으로, 실험 장치는 풍동(입구 풍속=15 m/sec)과 주유동의 난류

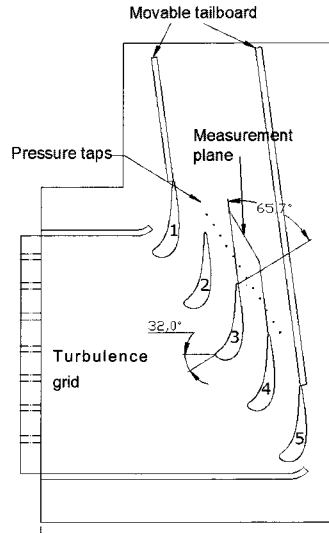


Fig. 1 Tested linear cascade

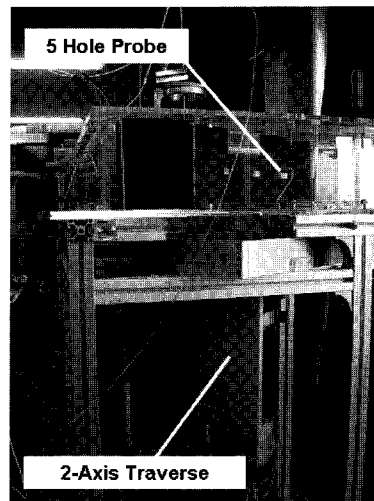


Fig. 2 Configuration of traverse system

강도를 높이기 위한 그리드, 5개의 선형 블레이드를 갖는 캐스케이드로 구성되었다. 블레이드 코드 길이는 126.2 mm, 피치는 102.7 mm, 스패ンは 160mm이며 블레이드의 입출구 각도는 각각 32도와 65.7도이다. 중앙 두 개의 블레이드 통로에서의 주기성을 확보하기 위해 외부 블레이드의 뒷전 하류에 회전이 가능한 유동조절판을 설치하였다.

시험부 입구에 설치된 난류 그리드는 5 mm 직경의

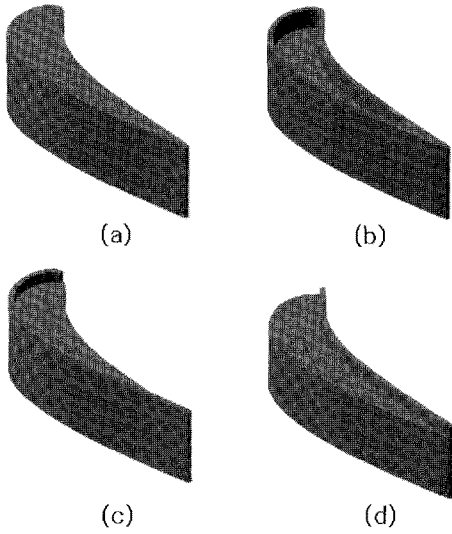


Fig. 3 Cross sectional view of tested blade tips (a) Plane tip, (b) Double squealer tip, (c) Suction side squealer tip, (d) Pressure side squealer tip

스테인리스 환봉으로 제작되었으며 다공율은 74.5%이다. 난류강도 측정을 위하여 열선유속계(Kanomax)를 사용하였고 중앙 블레이드 150mm 상류에서 측정된 난류강도는 9.7%였다. Fig. 1의 3번 블레이드 150mm 상류에서 측정된 경계층의 두께는 23mm, 배재 두께는 2.0mm, 모넨텀 두께는 1.4mm이며 블레이드 코드 길이에 대한 비는 각각 약 0.18, 0.016, 0.011이다.

유동의 이차 속도 벡터와 전압 손실계수의 측정을 위해 Fig. 2에 나타난 것처럼 팁 직경이 3mm인 원추형 5공 프로브와 2축 자동이송 장치가 사용되었고, 유동장은 블레이드 뒷전에서 블레이드의 코드 길이만큼 하류에서 측정되었다.

캐스케이드 내 블레이드 상류에는 입구 유동의 전압과 정압을 측정하기 위한 피토판을 설치하였고, 피토판과 5공 프로브의 각 압력은 측정 정확도가 $\pm 0.12\%$ 인 다채널 압력 스캐너 (DSA3217, 측정범위 $\pm 1\text{psid}$, Scanivalve)를 통해 PC로 저장되었다. 5공 프로브의 이송과 압력 저장은 Labview를 기반으로 제작된 제어 프로그램을 이용하였다.

실험은 블레이드 코드와 출구 속도를 기준으로 한 레이놀즈수가 2.41×10^5 의 조건에서 수행되었으며, 유동장 측정은 블레이드의 뒷전에서 블레이드 코드 길이만큼의 하류에서 수행되었다. 측정 영역은 Fig. 1의 3번

과 4번 블레이드의 하류에서 피치 방향으로 108mm이며 스패방향으로는 미드 스패에서 팁 방향으로 78mm로 선정하였고 스패 방향과 스패 방향으로의 이송 간격은 3mm로 하였다.

Fig. 3은 실험에 사용된 블레이드 팁의 형상을 나타낸 것이다. 실험에는 평면 팁, 팁의 압력면과 흡입면에 모두 스퀸러 림을 설치한 팁, 흡입면과 압력면 팁에 각각 스퀸러 림을 설치한 팁이 사용되었으며, 팁 간극의 크기는 블레이드 스패에 대해 각각 0.6%, 1.3%, 2.0%가 실험되었고 스퀸러 팁의 경우 스퀸러 림의 높이는 블레이드 스패의 3.75%로 하였다.

3. 실험 결과

Fig. 4는 5공 프로브로 측정된 평면 팁 블레이드 하류에서의 이차 유동과 전압손실 계수를 나타낸 것으로, 전압손실 계수는 식(1)로 정의되었다.

$$C_{p_{tot}} = \frac{P_{t0} - P_t}{0.5 \rho_0 U_0^2} \quad (1)$$

여기서, P_{t0} 와 P_t 는 각각 캐스케이드 입구와 5공 프로브로 측정된 전압이며 ρ_0 와 U_0 는 각각 입구에서의 공기 밀도와 주유동 속도이다.

Fig. 4(a) 팁 간극이 없는 경우(T=0%)의 결과로, 시계방향으로 회전하는 통로와류와 이에 의해 발생한 손실영역을 관찰할 수 있으며, 블레이드 후류에서 상대적으로 높은 손실영역이 존재함을 확인할 수 있다. 통로와류와 블레이드 후류 영역을 제외한 부분에서는 매우 낮은 전압손실 계수 값을 나타내고 있다.

Fig. 4(b), (c), (d)는 각각 평면팁을 사용한 경우의 팁 간극이 0.6%, 1.3%, 2.0%일 때의 이차유동 벡터와 전압손실 계수를 나타낸 것이다. 팁 간극이 없는 경우(Fig. 4(a))와 비교하면 팁 누설 와류와 이에 의한 높은 전압 손실 계수 영역을 관찰할 수 있다. 팁 간극이 커짐에 따라 팁 누설 와류의 크기와 강도가 커지는 것을 관찰할 수 있으며, 이에 의해 회전 방향이 반대인 통로 와류가 점점 약해지는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 5 (a), (b), (c), (d)는 각각 평면 팁, 압력면과 흡입면 팁에 모두 스퀸러 림을 설치한 팁, 흡입면 스퀸러 팁, 그리고 압력면 스퀸러 팁에서 팁 간극이 스패의 1.3% 일 때의 이차유동 벡터와 전압손실 계수 분

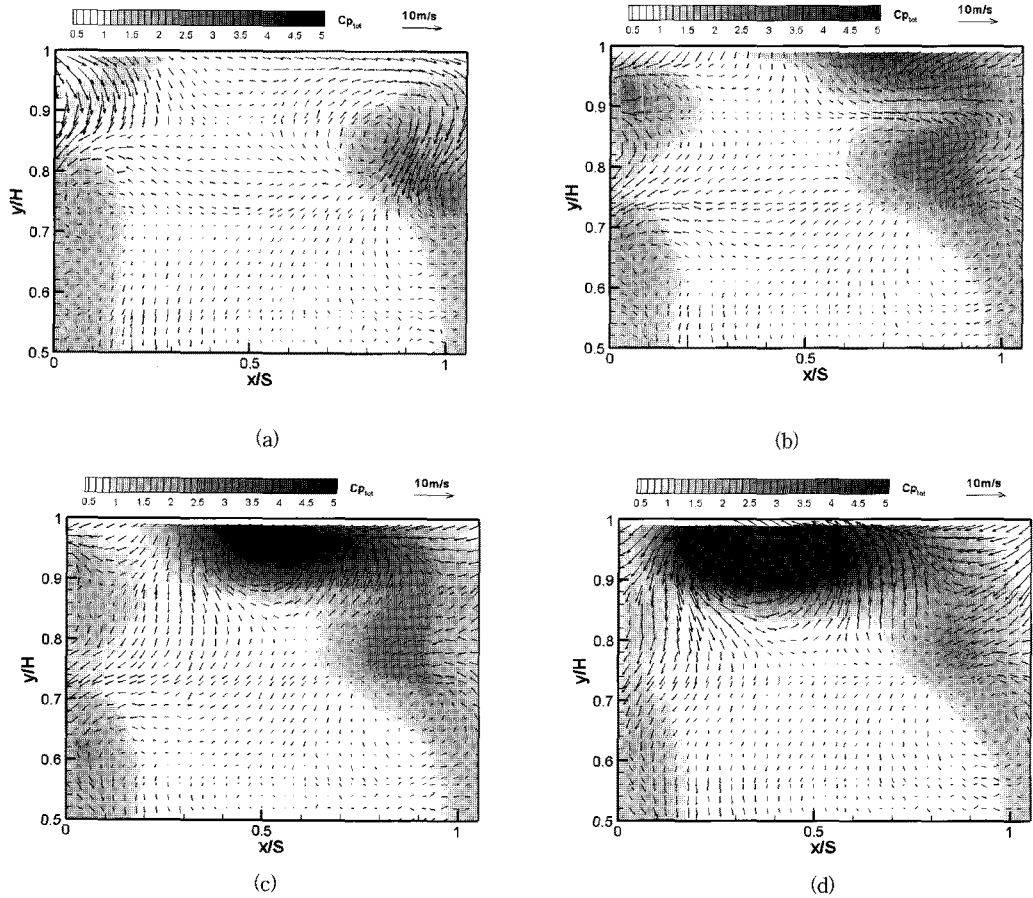


Fig. 4 Total pressure loss coefficient and secondary flow for plane tip case, (a)T=0%, (b)T=0.6%, (c)T=1.3%, (d) T=2.0%

포를 나타낸 것이다. 팁 간극이 없는 경우(Fig. 4(a))와 비교할 때, 팁 간극이 있는 경우에는 팁의 형상에 관계없이 모두 반시계 방향으로 회전하는 강한 누설유동이 존재하고, 이에 의해 회전 방향이 반대인 통과와류의 강도가 약화된 것을 볼 수 있다. 팁 형상 변화에 따라 누설 유동의 중심 위치가 달라지고 있으며, 누설 유동의 강도도 달라지는 것을 볼 수 있다. 이러한 현상은 양면 스켈러 팁의 경우, 스켈러 림 사이의 좁은 래버린스 셀(labyrinth seal)처럼 유동 저항으로 작용하여 간극 유동 자체가 감소하게 된다. 흡입면 스켈러 팁의 경우, 누설유동의 팽창이 흡입면 선상에서 일어나므로 누설와류의 중심이 압력면 쪽으로 치우치며, 압력면 스켈러 팁의 경우 팁 간극 내에서 1차 팽창이 발생한 후, 흡입면 쪽으로 빠져나오면서 2차 팽창이 일어나기 때문에 누설유동의 모멘텀이 작아져 누설와

류의 중심이 다른 팁의 경우에 비해 흡입면 쪽에 가까워 위치하는 것으로 판단된다.

Fig. 5에서 간극이 존재하는 경우, 평면 팁의 경우가 가장 큰 누설유동에 의한 손실을 보이는 것으로 나타났고, 스켈러 림을 압력면과 흡입면 팁에 모두 설치한 경우가 가장 낮은 누설유동에 의한 전압손실을 나타내고 있다. 하지만 Fig. 5의 결과는 전압손실 계수의 값만을 나타낸 것으로, 보다 정확한 팁 형상 영향의 고찰을 위해서는 측정 면에서의 질량 유량 분포를 고려하여야 한다. 이를 위해 식(2)과 같이 전압손실 계수를 질량 평균하여 전체 측정면의 전체 전압손실 계수를 계산하였다.

$$\overline{Cp_{tot}} = \frac{\sum_i \sum_j (Cp_{tot} u dA)_{ij}}{\sum_i \sum_j (u dA)_{ij}} \quad (2)$$

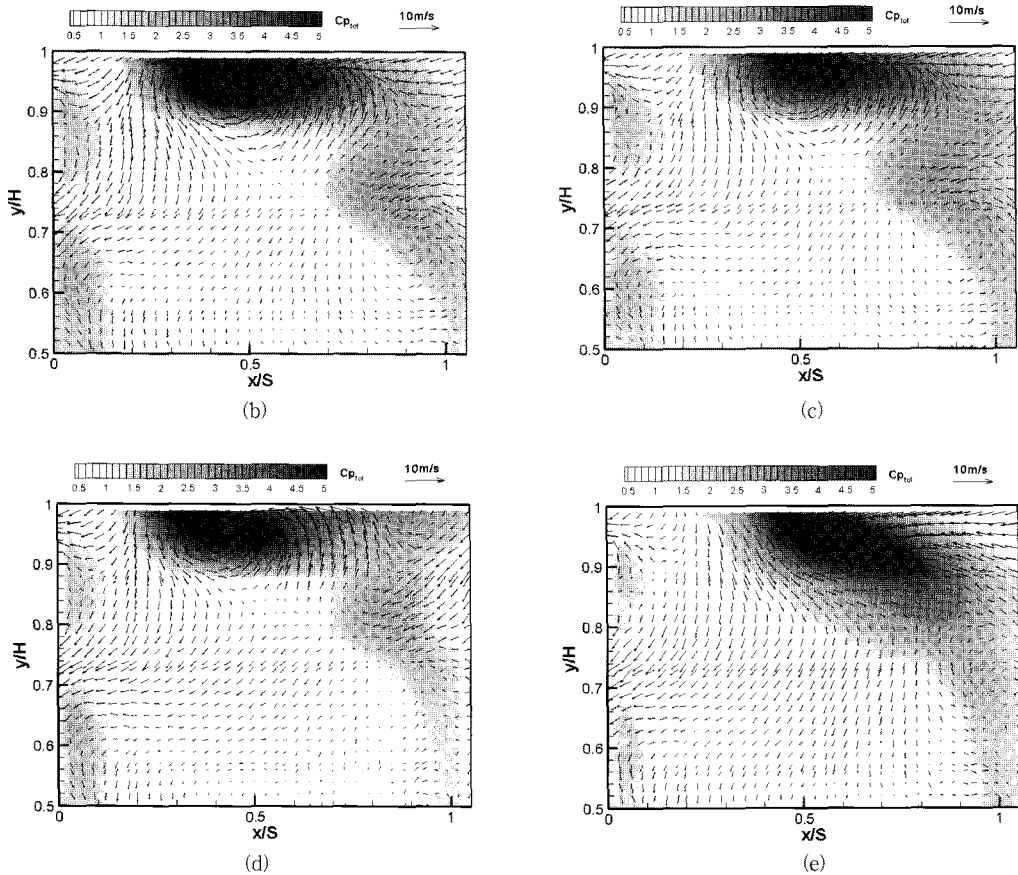


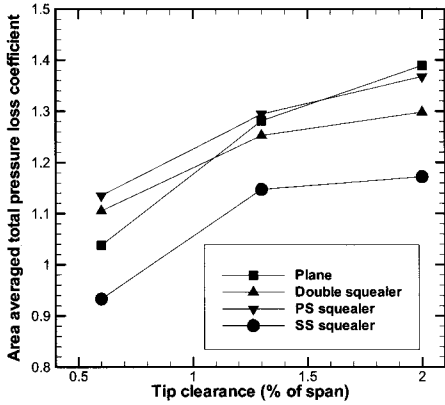
Fig. 5 Total pressure loss coefficient and secondary flow (a)Plane tip, $T=1.3\%$, (b) Double squealer tip, $T=1.3\%$, (c) Suction side squealer tip, $T=1.3\%$, (d) Pressure side squealer tip, $T=1.3\%$

여기서, u 는 5공 프로브의 축방향 속도, 즉 블레이드 출구방향 속도이고, 첨자 i 와 j 는 측정면에서 5공 프로브의 피치 방향과 스펀 방향의 측정 위치이다.

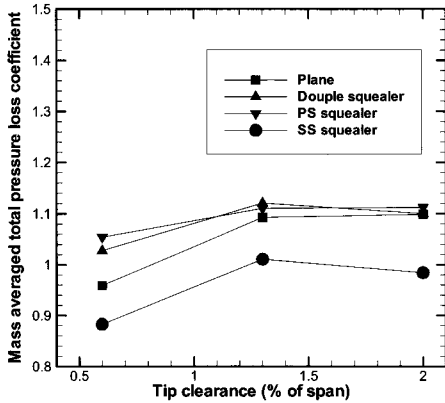
Fig. 6(a)와 (b)는 각각 각 팁 형상에 대해 팁 간극의 크기에 따른 면적 평균과 질량 평균된 전압 손실 계수를 나타낸 것이다. 팁 간극이 커짐에 따라 면적 평균 전압 손실 계수(Fig. 6(a))는 모든 팁 형상에 대해 증가하고 평면팁과 압력면 스킨러 팁의 경우가 압력면과 흡입면 모두에 림을 설치한 경우나 흡입면 스킨러에 비해 높은 평균 전압 손실 계수를 보였다. 모든 팁 간극에 대해 흡입면 스킨러 팁이 가장 낮은 평균 전압 손실 계수를 보여 누설 유동과 누설 와류의 감소에 가장 좋은 팁 형상임을 관찰할 수 있다.

질량 평균된 전체 전압손실 계수 값 (Fig. 6(b))은 흡입면 스킨러의 경우가 가장 낮았으며 평면팁에 비해 압력면과 흡입면 팁에 모두 림을 설치한 팁의 손실이 크게 나타났다. 이러한 경향은 면적 평균 전압손실 계수와는 다른 경향으로, 이것은 각 팁 형상에서 높은 전압손실을 갖는 누설유동 영역에서의 식(2)의 축방향 속도 성분이 다르게 나타나기 때문이다. 평면팁의 경우 압력면과 흡입면 모두에 스킨러 림을 설치한 경우에 비해 강한 누설 와류가 발생하고, 이에 의해 식(2)에 정의된 축방향 속도가 상대적으로 낮기 때문에 낮은 질량 평균 압력 손실 계수 값을 보인다.

Kwak 등⁽⁸⁾이 수행한 블레이드 팁 열전달 실험에서 흡입면 스킨러 팁의 경우가 가장 낮은 열전달 계수를 보였고 본 실험 결과에서도 흡입면 스킨러 팁의 경우가 가장 좋은 전압 손실 감소 효과를 가져왔다. 하지



(a)



(b)

Fig. 6 Averaged total pressure loss coefficient, (a) area averaged, (b) mass averaged

만 흡입면에만 스퀸러 림을 설치한 경우는 림 자체의 열전달 계수가 높고 불균일하기 때문에 파손의 위험이 크다는 단점이 있다. 따라서 본 연구의 결과와 Kwak 등⁽⁸⁾의 연구 결과를 바탕으로 흡입면 스퀸러 림의 유동 손실 및 열전달 감소 효과를 유지하면서 구조적인 안정성을 보강한다면 기존의 평면팁이나 양면 스퀸러 팁에 비해 우수한 형상의 팁을 제시할 수 있을 것으로 기대된다.

4. 결론

본 논문에서는 항공기의 터빈 블레이드를 모사한

선형 캐스케이드를 구성하고 다양한 팁의 형상에 대해 5공 프로브로 이차 유동 벡터와 전압손실을 측정하였다. 측정 결과를 바탕으로 한 결론은 다음과 같다.

- 1) 팁 누설유동은 통로와류와 반대의 회전 방향을 가지면 통로와류에 비해 매우 큰 강도를 가졌다.
- 2) 팁 형상의 변화에 따라 누설와류의 강도와 중심의 위치가 달라졌으며, 압력면과 흡입면 팁 모두에 스퀸러 림을 설치한 팁과 흡입면 스퀸러 팁의 경우가 평면팁에 비해 약한 누설와류를 보였다.
- 3) 팁 간극의 크기가 커짐에 따라 강한 팁 누설와류가 형성되고, 이에 의해 통로와류는 팁 간극이 커질수록 약화된다.
- 4) 흡입면 스퀸러 팁의 경우가 가장 낮은 질량평균 전압손실 계수를 나타내었고, 압력면과 흡입면 모두에 림을 설치한 경우는 평면팁에 비해 높은 질량평균 전압손실을 보였다.

후 기

이 논문은 지식경제부 한국형헬기 민군겸용구성품 개발사업 (KARI주관) 및 2008년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임. (NO. R01-2008-000-11406-0)

참고문헌

- (1) Wei, L., Weiyang, Q., and Dawei, S., 2008, "Tip Clearance Flows in Turbine Cascades," Chinese Journal of Aeronautics Vol. 21, No. 3, pp. 193~199.
- (2) Ma, H. and Jiang, H., 2001, "Three - Dimensional Turbulent Flow in The Tip Region of an Axial Compressor Rotor Passage at a Near Stall Condition," ASME Paper 2001-GT-0331.
- (3) Schabowski, Z. and Hodson, H., 2007, "The Reduction of Over Tip Leakage Loss in Unshrouded Axial Turbines Using Winglets and Squealers," ASME Paper GT2007-27623.
- (4) Prakash, C., Lee, C., Cherry, D., Wadia, A., and Doughty, R., 2005, "Analysis of Some Improved Blade Tip Concepts," Journal of Turbomachinery, Vol. 128, No. 4, pp. 639~642.

- (5) Behr, T., Kalfas, A. I., and Abhari, R. S., 2008, "Control of Rotor Tip Leakage Through Cooling Injection from The Casing in a High-Work Turbine," *Journal of Turbomachinery*, Vol. 130, No. 3, pp. 031014.
- (6) Dey, D. and Camci, C., 2001, "Aerodynamic Tip Desensitization of an Axial Turbine Rotor Using Tip Platform Extensions," *ASME Paper 2001-GT-0484*.
- (7) Lee, S. W. and Chae, B. J., 2008, "Effects of Squealer Rim Height on Aerodynamic Losses Downstream of a High-Turning Turbine Rotor Blade," *Experimental Thermal and Fluid Science* 32 (2008) 1440-1447.
- (8) Kwak, J. S., Ahn, J., Han, J. C., Lee, C. P., Bunker, R. S., Boyle, R., and Gaugler, R., 2003, "Heat Transfer Coefficients on the Squealer Tip and Near-Tip Regions of a Gas Turbine Blade With Single or Double Squealer," *Journal of Turbomachinery*, Vol. 125, No. 4, pp. 778~787.