

압력면익단소익이 터빈 동익 압력면스킬러팁 하류의 팁누설유동 및 압력손실에 미치는 영향

천 주 홍* · 이 상 우*†

* 금오공과대학교 기계공학과

Effects of Pressure-Side Winglet at an Elevation of Tip Surface on the Tip-Leakage Flow and Aerodynamic Loss Downstream of a Turbine Blade Equipped with Pressure-Side Squealer Tip

Joo Hong Cheon* and Sang Woo Lee*†

* Dept. of Mechanical Engineering, Kumoh National Institute of Technology

(Received March 10, 2016 ; Revised August 2, 2016 ; Accepted August 9, 2016)

Key Words: Gas Turbine(가스터빈), Unshrouded Tip(비슈라우드팁), Pressure-Side Winglet(압력면익단소익), Pressure-Side Squealer(압력면스킬러), Total-Pressure Loss Coefficient(전압력손실계수)

초록: 본 연구에서는 압력면익단소익의 폭이 터빈 동익 압력면스킬러팁 하류의 팁누설유동 및 압력손실에 미치는 영향에 대하여 연구하였다. 팁간극비 $h/s = 1.36\%$ 에 대하여, 흡입면스킬러의 높이는 $h_p/s = 3.75\%$ 로 일정하게 유지하고, 압력면익단소익의 폭은 $w/p = 2.64\%, 5.28\%, 7.92\%, 10.55\%$ 등으로 변화시키면서 실험을 수행하였다. 일반적으로 압력면익단소익의 폭이 증가할수록, 통로와류 영역에서의 압력손실은 감소하였지만 팁누설유동 영역에서는 압력손실이 오히려 증가하였다. 그 결과 익단소익의 폭이 증가할수록, 질량평균 압력손실은 매우 소폭 감소하는 경향을 보였다. 본 연구 결과, 압력면스킬러팁에 설치된 압력면익단소익은 압력손실 저감에 거의 기여를 하지 못함을 확인할 수 있었다.

Abstract: Effects of pressure-side winglet width on the tip leakage flow and aerodynamic loss downstream of a turbine blade with a pressure-side squealer rim have been investigated for the tip gap-to-span ratio of $h/s = 1.36\%$. The pressure-side squealer has a fixed height-to-span ratio of $h_p/s = 3.75\%$ and the pressure-side winglet, which is installed at an elevation of tip surface, has width-to-pitch ratios of $w/p = 2.64\%, 5.28\%, 7.92\%$ and 10.55% . The results show that with increasing w/p , aerodynamic loss in the passage vortex region decreases, whereas that in the leakage flow region increases. As a result, the mass-averaged loss coefficient all over the measurement plane tends to decrease minutely with the increment of w/p . It is concluded that the pressure-side winglet for the pressure-side squealer tip can hardly contribute to the tip-leakage loss reduction.

- 기호설명 -

b : 축방향 코드

c : 코드

C_{pt} : 전압력손실계수, 식 (1)

\bar{C}_{pt} : 질량평균전압력손실계수, 식 (3)

$\bar{C}_{pt,z}$: 피치방향질량평균전압력손실계수, 식 (2)

h : 팁간극 높이

h_p : 압력면스킬러팁의 높이

h_{ps} : 전면스킬러의 높이

p : 피치

P_t : 전압

$P_{t,0}$: 익렬 상류에서 측정된 기준 전압

s : 스패

U, V, W : 3차원 평균속도

w : 압력면익단소익의 폭

† Corresponding Author, swlee@kumoh.ac.kr

© 2016 The Korean Society of Mechanical Engineers

xyz : 익렬 좌표계, Fig. 4
 y_m : 측정위치에서 피치방향 좌표, Fig. 4

그리스문자

β : 유동의 요각 (yaw angle)
 $\bar{\beta}_z$: 피치방향 질량평균 유동 요각
 ν : 동점성계수
 ρ : 밀도

1. 서 론

가스터빈 엔진의 터빈 단(stage)은 케이싱에 고정된 정익과 고속으로 회전하는 동익으로 구성된다. 회전하는 동익의 팁(tip)은 크게 슈라우드팁(shrouded tip)과 비슈라우드팁(unshrouded tip)으로 나눌 수 있다. 슈라우드팁은 인접 동익팁들이 띠 형태의 슈라우드에 의해 연결된다. 이 슈라우드 바깥쪽 면에 설치된 씰(seal)이 슈라우드와 케이싱 사이의 누설유동을 막아 주므로, 슈라우드팁은 팁간극 압력손실을 크게 줄여 줄 수 있다. 그럼에도 불구하고 열전달과 구조적인 측면의 문제점으로 인해, 현재 대부분의 고성능 터빈 제 1 단 동익에는 비슈라우드팁이 채용되고 있다.

단순 형태의 비슈라우드팁인 평면팁(plane or flat tip)에서는 팁간극(tip gap)을 통하여 익형의 압력면 쪽에서 흡입면 쪽으로 강한 누설유동이 불가피하게 발생한다. 이 팁누설유동은 팁간극을 빠져나온 뒤, 터빈 통로 유동과 상호작용하여 팁 누설와류로 발달된다.⁽¹⁻³⁾ 이와 같은 팁 근처 3차원 유동은 압력손실을 증가시켜 터빈 단의 효율을 떨어뜨린다. 이 평면팁의 문제점을 보완하기 위해 스켈러(squealer)⁽⁴⁻⁶⁾와 익단소익(winglet)⁽⁷⁻¹⁰⁾이 장착된 팁에 대한 연구들이 진행되고 있다. 최근 Lee와 Lee⁽¹¹⁾는 압력면스켈러(pressure-side squealer) 설치 팁에 대한 연구를 통하여 압력면스켈러가 평면팁과 비교하여 최대 11.6%의 압력손실 저감효과가 있음을 밝혔다. 이와는 달리 압력면익단소익은 평면팁 대비 최대 1.4% 밖에 압력손실을 저감시키지 못하였다.⁽⁷⁾

Fig. 1은 평면팁에 압력면스켈러가 설치된 팁의 간극유동을 정성적으로 표현한 단면유동 개략도⁽¹¹⁾이다. 익형 압력면을 따라 케이싱 쪽으로 이동하는 유동은 부착선(attachment line)을 기준으로 크게 통로유동(passage flow)과 누설유동(leakage flow)으로 나뉜다. 부착선 좌측의 유동은 익렬 통

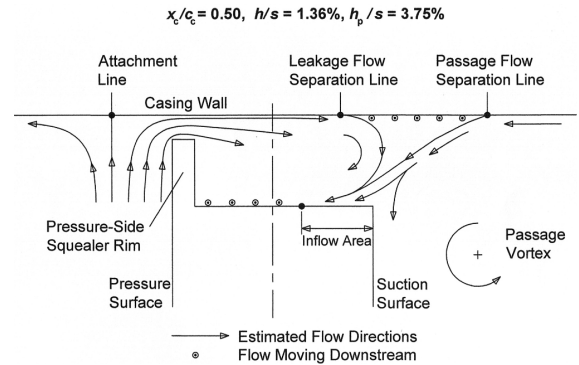


Fig. 1 Tip gap flow sketch for pressure-side squealer tip with no winglet⁽¹¹⁾

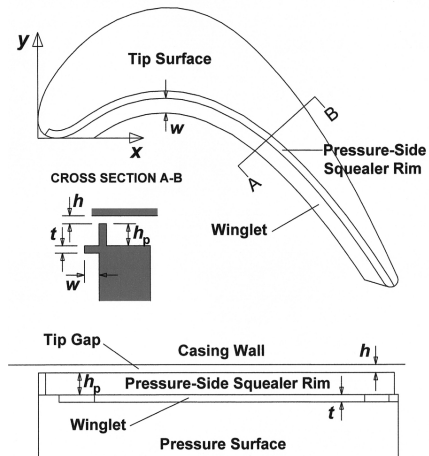


Fig. 2 Pressure-side squealer tip equipped with pressure-side winglet to be tested

로를 가로질러 인접 익형 흡입면 쪽으로 이동하고(통로유동), 부착선과 압력면스켈러 사이의 유동은 압력면스켈러를 넘어 팁간극 내부로 진입한다(누설유동). 이 통로유동과 누설유동은 흡입면 근처에서 서로 마주치면서 케이싱으로부터 박리되는데, 이 박리점들을 각각 누설유동박리선(leakage flow separation line)과 통로유동박리선(passage flow separation line)이라고 불린다.

본 연구에서는 팁누설 유입유동(Fig. 1)의 차단을 목적으로 Fig. 2와 같이 압력면스켈러의 하단을 따라 익단소익을 설치하였다. 이 압력면익단소익은 구조적인 측면을 고려하여, 그 윗면이 팁 표면과 일치하도록 설계하였다. 본 연구의 목적은 Fig. 2와 같은 압력면익단소익의 폭(w)이 압력면스켈러팁의 팁누설유동 및 압력손실에 미치는 영향을 연구하는 것이다. 이를 위해 5공프로우브를 사용하여 w를 변화시키면서 익렬 하류에서 3차원 유동장을 측정하고, 이 데이터를 이용하여

압력손실계수를 계산할 예정이다. 본 연구의 측정 결과들은 향후 CFD를 이용한 팁 형상 최적설계에 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

2. 실험

2.1 시험설비

Fig. 3에서와 같이 본 연구에서 도입한 시험설비는 크게 토출형 풍동, 입구덕트, 터빈 익렬, 출구덕트 등으로 구성된다. 토출형 풍동은 최대 40m/s까지 출구 유속의 조절이 가능하다. 이 풍동 출구로부터 나온 균일 유동은 단면이 420mm × 320mm인 입구덕트로 유입된다. 이것의 입구 상하 벽에는 트립와이어가 부착되어 있어서, 상하벽 유동이 난류 경계층으로 발달된다. 입구덕트 하류에는 6개의 동익 익형으로 구성된 터빈 익렬(cascade)이 설치되어 있다. 이것은 산업용 가스 터빈의 터빈 제 1 단 동익 프로파일 근거로 large-scale로 제작되었다.⁽⁴⁾ 익렬의 축방향코드(b), 코드(c), 피치(p), 스패น(s) 등은 각각 196.0mm, 217.8mm, 151.6mm, 320.0mm 등이고, 그 유입각과 유출각은 각각 56.4°와 -62.6°이다.

동익 익렬의 6개의 익형 중 중간부에 위치하는 #2 - #5 익형은 아랫판에 뚫려 있는 익형 단면형상의 홈 내부로 삽입되어 볼트로 아랫벽에만 고정되고, 나머지 #1과 #6은 상하벽 모두에 볼트로 고정된다. 따라서 팁간극은 익렬 상단에 존재하게 되며, 익형의 삽입 깊이를 조절하면 팁간극 높이(h)를 바꿀 수 있다. 본 연구에서는 Fig. 4와 같은 좌표계 xyz 를 도입하였고, 측정위치에서 y -축과 평행한 새로운 y_m -좌표를 추가로 정의

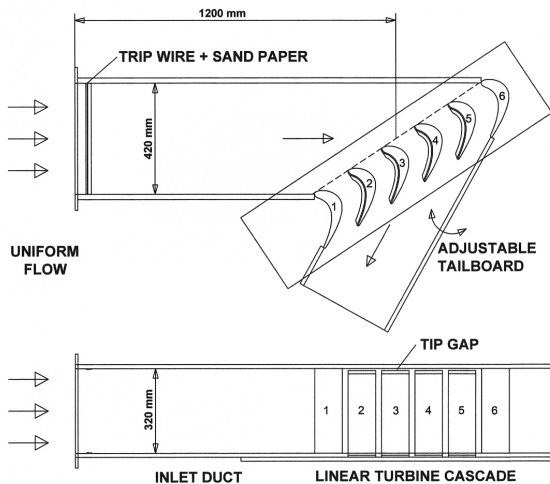


Fig. 3 Overall view of cascade wind tunnel

하였다.

2.2 측정장치 및 측정방법

본 연구에서는 개인용컴퓨터로 전체 측정시스템을 온라인화하였으며, 이를 위해 A-D변환기(NI, PCI-6036E)와 DI/O보드(NI, PCI-6503)가 컴퓨터에 내장되어 있다. 압력변환기(MKS, Type 120AD-00010-R-EB)에 의해 변환된 압력신호는 16비트 A-D변환기를 통해 컴퓨터로 전달된다. 본 연구에서 사용한 자동이송장치는 직선운동 이송축, 스테핑모터, 스테핑모터 드라이버 등으로 구성되어 있다. 이 이송장치는 DI/O보드로부터 공급되는 펄스입력을 통해서 제어된다.

3차원 유동 및 압력손실을 측정하기 위해 Fig. 4와 같이 지지대 형태가 직선인 2단 원추형 5공프로우브를 사용하였다. 이 5공프로우브는 미국 United Sensors 사에 특별한 사양으로 주문, 제작되었다. 이 5공프로우브의 선단 직경은 3.2mm이고, 프로우브 지지대는 6.4mm로 보강되어 있다. 5공프로우브는 $x/b = 1.2$ 인 익렬 하류에 익렬의 유출각(blade outlet angle)과 평행하게 배치된다.

본 실험에서는 프로우브 고정법(non-nulling method)을 적용하여 5공프로우브를 보정하였다.⁽¹²⁾ 5공프로우브의 보정에는 분해능이 0.2도인 2축 회전장치를 사용하였고, 보정실험은 피치각과 요각이 각각 -40도에서 40도 사이 영역에서 5도 간격으로 이루어졌다. 5공프로우브의 5개의 압력을 순차적으로 측정하기 위하여 압력스캐너(Furness Controls, FC091-MKII)를 사용하였고, 이 압력스캐너도 DI/O보드를 이용하여 제어하였다.

2.3 실험범위

자유유동 속도를 15m/s로 고정하고 실험을 수

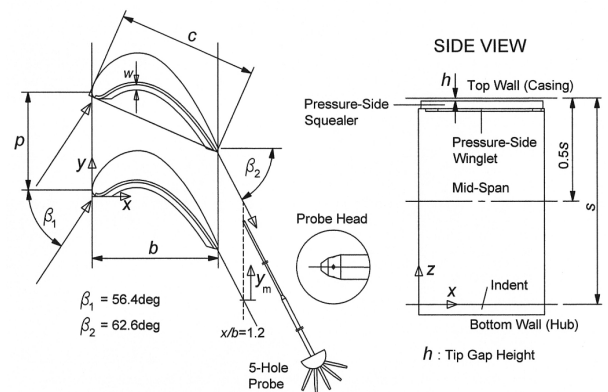


Fig. 4 Arrangement of cascade

행하였고, 이 입구 자유유동 속도와 코드길이를 기준으로 한 Reynolds 수($Re=U_{\infty}c/\nu$)는 2.09×10^5 이다. 이때 입구 자유유동 난류강도는 0.3%로 측정되었다. 익렬입구 $0.23c$ 상류에서 측정된 경계층의 배제두께, 운동량두께는 각각 5.2mm, 4.0mm 등이었다. 이 값들은 스패의 1.6%와 1.3%이며, 경계층 형상계수는 1.3으로 대표적인 평판 위 난류 경계층에 해당되는 수치이다. 3차원 유동의 측정은 익렬 하류인 $x/b = 1.2$ 에서 이루어졌고, 스패방향으로는 미드스팬($z/s = 0.5$)에서 케이싱($z/s = 1.0$) 사이에서 측정되었다.

본 실험에서는 틱간극높이의 비를 $h/s = 1.36\%$ 로 고정하였고, 압력면스컬러의 높이를 $h_p/s = 3.75\%$ 로 고정하였다. 본 연구의 목적이 익단소익의 폭의 영향을 연구하는 것이므로, 익단소익의 폭은 4mm, 8mm, 12mm, 16mm 등 4 경우($w/p = 2.64\%, 5.28\%, 7.92\%, 10.55\%$)에 대해 실험을 수행하였다. 이때 스컬러와 익단소익의 두께는 스패의 1.25%로 고정하였다. 입구 자유유동의 균일성은 자유유동 속도의 1.0% 이내이며, 5공프로우브의 이송오차는 ± 0.1 mm 이내이다. Abernethy 등⁽¹³⁾의 방법을 적용한 오차해석 결과, 난류강도와 유속구배의 영향이 배제된 상태에서 피치각, 요각, 정압, 전압의 측정오차(uncertainty interval)은 각각 $\pm 0.75^\circ$, $\pm 0.94^\circ$, 자유유동 동압의 $\pm 0.72\%$, 자유유동 동압의 $\pm 1.04\%$ 등으로 나타났다.

3. 결과 및 검토

3.1 3차원 유동장

일반적으로 틱간극이 없다면 터빈 통로 하류에는 Fig. 1에서와 같이 반시계방향으로 회전하는 통로와류(passage vortex)만 존재한다. 이 통로와류는 익형 앞전 끝벽 근처에서 생성된 말발굽와류의 압력면다리(pressure-side leg)가 발달하여 형성된 것으로 알려져 있으며, 틱누설이 없을 경우 터빈 동의 통로 내부에서 발생하는 가장 강한 와류이다.

Fig. 5는 측정평면 즉 $x/b = 1.2$ 에서 2차유동 속도벡터를 그린 것이다. 이 속도벡터는 각 측정위치에서의 y - 및 z -축 유속을 미드스팬의 값으로 뺀 후 그린 것이다. 일반적으로 w/p 에 관계없이 넓은 영역에 걸쳐 반시계방향의 통로와류가 관찰되며, 통로와류 영역과 케이싱 사이에 시계방향으로 회전하는 벽제트(wall jet) 형태의 강력한 틱

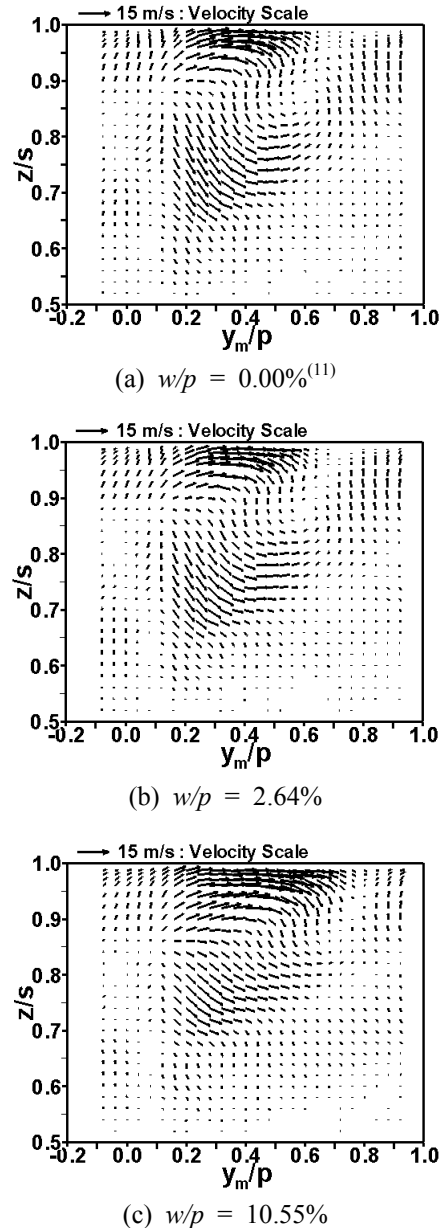


Fig. 5 Vector plots at $x/b = 1.2$ for $h/s = 1.36\%$

누설와류가 존재한다. 이 틱누설와류는 w/p 가 증가할수록 강해지고, 그 범위도 피치방향으로 크게 확대되었다. 익단소익이 설치되지 않을 경우 (Fig. 5a), 이 틱누설와류는 스패방향으로는 케이싱 근처 $0.9 < z/s < 1.0$ 에서 국한되어 존재하지만, $w/p = 10.55\%$ 에서는 그 영역이 미드스팬 방향으로 조금 더 확대되었다.

3.2 전압손실계수의 정의

압력손실은 기준 전압(total pressure) 대비 측정 국소 전압의 감소 정도를 의미하며, 다음과 같이 전압손실계수(total-pressure loss coefficient)의 형태

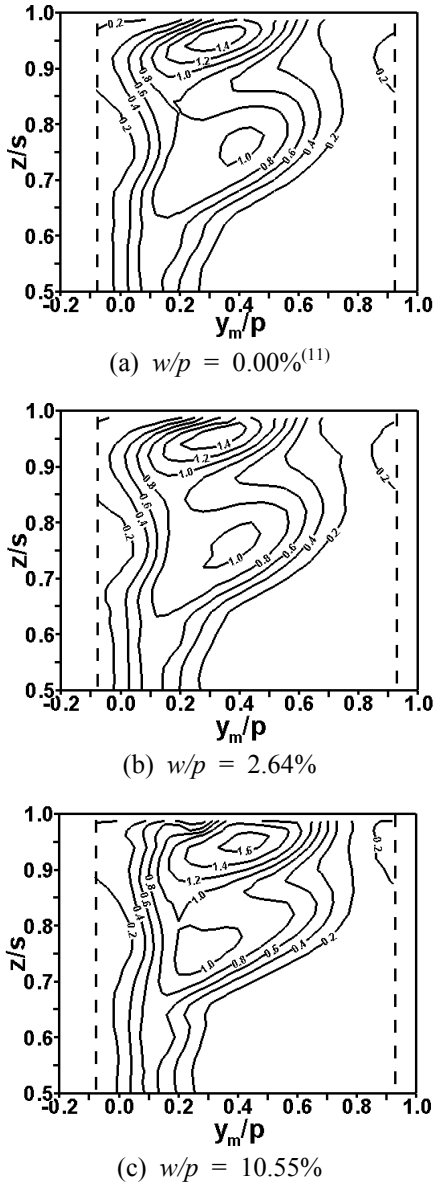


Fig. 6 Contours of C_{pt} at $x/b = 1.2$ for $h/s = 1.36\%$

로 정의된다.

$$C_{pt} = \frac{P_{t0} - P_t}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2} \quad (1)$$

이 식에서 P_{t0} 는 입구 덕트에서의 기준 전압을 나타내고, P_t 는 측정 위치에서 얻은 국소 전압을 나타낸다. 스펠방향 즉 z -축 방향으로의 압력손실 분포를 이해하기 위해서는 피치방향으로 질량 평균된 전압손실계수가 매우 유용하다. 이 피치방향 질량평균전압손실계수(pitch-wise mass-averaged total-pressure loss coefficient)는 다음과 같이 정의

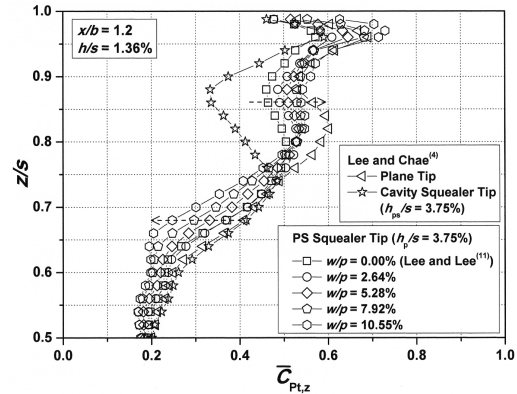


Fig. 7 Profiles of $\bar{C}_{Pt,z}$ at $x/b = 1.2$ for $h/s = 1.36\%$

된다.

$$\bar{C}_{Pt,z} = \frac{\int_0^p \rho U C_{pt} dy_m}{\int_0^p \rho U dy_m} \quad (2)$$

측정 영역 전체에 걸쳐 질량평균된 전압손실계수는 다음의 식으로 정의될 수 있다.

$$\bar{C}_{pt} = \frac{\int_0^p \int_{0.5s}^s \rho U C_{pt} dz dy_m}{\int_0^p \int_{0.5s}^s \rho U dz dy_m} \quad (3)$$

3.3 전압손실계수

동익 익렬 하류에서의 압력손실은 크게 미드스팬 영역, 통로와류 영역, 팁누설와류 영역 등에서 발생된다. 미드스팬 근처에서의 손실은 주로 익형에서의 경계층의 성장과 뒷전 박리로 인해 발생하는 형상손실(profile loss)이다. 일반적으로 평면팁의 경우 통로와류에 의한 최대 국소 압력손실계수는 팁누설와류 영역보다는 작지만 그 면적은 훨씬 넓다고 알려져 있다.⁽⁵⁾

Fig. 6은 국소 전압손실계수(C_{pt})의 분포를 나타낸다. 단소익이 존재하지 않는 경우인 Fig. 6(a)의 결과⁽¹¹⁾와 단소익의 폭이 2mm인 Fig. 6(b) ($w/p = 2.64\%$)의 결과를 비교해 보면, 전압손실계수 분포의 차이는 비교적 작아 보인다. 그러나 단소익의 폭이 16mm로 증가하면[Fig. 6(c)], 팁누설유동 영역의 C_{pt} 최대치가 1.4에서 1.6으로 증가하였다. 이와 함께 팁누설유동 영역은 증가하는 반면, 통로유동 영역은 감소하였다.

Fig. 7은 피치방향 질량평균전압손실계수 $\bar{C}_{Pt,z}$

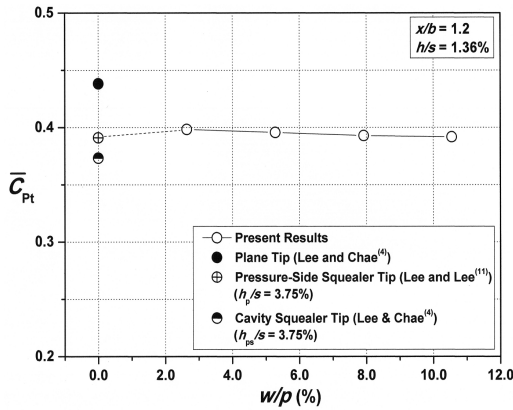


Fig. 8 \bar{C}_{Pt} as a function of w/p at $x/b = 1.2$ for $h/s = 1.36\%$

의 프로파일을 나타낸다. 이전 연구 결과와의 비교/검토를 위해, 평면팁 및 전면스킬러팁의 결과들⁽⁴⁾과 익단소익이 없는 압력면스킬러팁의 결과⁽¹¹⁾도 Fig. 7에 나타내었다. 익단소익의 폭이 증가할수록 $\bar{C}_{pt,z}$ 의 프로파일은 일정한 경향을 보여주고 있다. 즉 $z/s < 0.8$ 에서는 w/p 가 증가할수록 $\bar{C}_{pt,z}$ 가 지속적으로 감소하는 경향이 나타나고, $z/s > 0.8$ 에서는 반대로 w/p 가 증가할수록 $\bar{C}_{pt,z}$ 가 지속적으로 증가하는 경향이 나타났다. 이와 함께 $z/s < 0.8$ 에서는 w/p 에 관계없이 항상 본 연구의 $\bar{C}_{pt,z}$ 가 평면팁이나 전면스킬러팁보다 더 작았지만, $z/s > 0.8$ 에서는 $\bar{C}_{pt,z}$ 가 전면스킬러팁보다는 크고 평면팁보다는 더 작게 나타났다. Fig. 7로부터, $z/s < 0.8$ 일 때 w/p 가 증가하면서 나타나는 압력손실의 저감효과는 $z/s > 0.8$ 에서의 압력손실 증가와 상쇄됨을 확인할 수 있다.

Fig. 8은 식 (3)과 같이 정의된 측정영역 전체에 걸쳐 질량평균된 전압력손실계수 \bar{C}_{pt} 를 w/p 의 함수로 표시한 것이다. Fig. 8에서, 본 연구에서의 측정 결과는 평면팁에 의한 압력손실보다는 확실히 더 작지만, 전면스킬러팁의 압력손실보다는 더 크음을 알 수 있다. 그러나 Fig. 8에서 알 수 있듯이, 익단소익 폭의 변화에 따른 \bar{C}_{pt} 값들이 익단소익이 존재하지 않는 경우와 거의 같은 값을 가지므로, 압력면익단소익의 설치가 압력면스킬러팁의 압력손실 저감에 기여하지 못함을 확인할 수 있다.

3.4 유동의 요약

Fig. 9는 식 (2)와 같은 방법으로 피치방향으로 질량평균된 요약 $\bar{\beta}_z$ -프로파일을 보여 준다. $\bar{\beta}_z$ 가

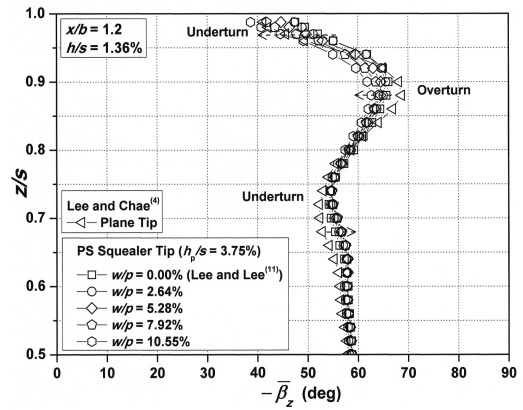


Fig. 9 Profiles of $\bar{\beta}_z$ at $x/b = 1.2$ for $h/s = 1.36\%$

모든 z/s 에서 익형의 설계 유출각 β_2 와 일치하는 것이 이상적이나, 실제로는 Fig. 9와 같이 저선회(underturn)와 과선회(overturn)가 발생한다.

압력면익단소익의 폭이 증가할수록 $z/s < 0.8$ 에서 발생하는 저선회가 감소되고, $0.84 < z/s < 0.9$ 에서 발생하는 과선회도 감소하는 바람직한 결과를 얻었다. 그러나 압력면익단소익의 폭이 증가할 때, $z/s > 0.9$ 에서는 저선회가 더 증가하는 나쁜 결과를 얻었다.

4. 결론

본 연구에서는 압력면익단소익의 폭(w)이 압력면스킬러팁의 팁누설유동 및 압력손실에 미치는 영향을 연구하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 압력면익단소익의 폭이 클 경우, 팁누설유동 영역에는 벽제트 형태의 강력한 팁누설와류가 존재하였다.
- (2) 압력면익단소익의 폭이 증가할수록, 통로와류 영역에서의 압력손실은 감소하였지만 팁누설유동 영역에서는 압력손실이 오히려 증가하였다.
- (3) 본 연구의 질량평균 압력손실은 평면팁에 비해서는 더 낮았지만, 전면스킬러팁보다는 더 크게 나타났다. 익단소익의 폭이 증가할수록, 질량평균 압력손실은 소폭 감소하는 경향을 보였다.
- (4) 압력면익단소익의 폭이 증가할 때, 대부분의 영역에서 유동의 선회 특성이 더 좋아졌지만, 팁누설유동 영역에서는 저선회가 더 심화되는 나쁜 결과를 얻었다.
- (5) 본 연구를 통하여 압력면스킬러팁에 설치된 압력면익단소익은 팁의 압력손실 저감에 거의 기

여를 하지 못함을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 금오공과대학교 학술연구비에 의하여 연구된 논문입니다.

참고문헌 (References)

- (1) Bindon, J. P., 1989, "The Measurement and Formation of Tip Clearance Loss," *ASME Journal of Turbomachinery*, Vol. 111, pp. 257~263.
- (2) Yamamoto, A., 1989, "Endwall Flow/Loss Mechanism in a Linear Turbine Cascade With Blade Tip Clearance," *ASME Journal of Turbomachinery*, Vol. 111, pp. 264~274.
- (3) Lee, S. W., Moon, H. S. and Lee, S. E., 2009, "Tip Gap Height Effects on Flow Structure and Heat/Mass Transfer over Plane Tip of a High-Turning Turbine Rotor Blade," *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 30, pp. 198~210.
- (4) 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*, Vol. 32, pp. 1440~1447.
- (5) Lee, S. W. and Choi, M. Y., 2010, "Tip Gap Height Effects on the Aerodynamic Performance of a Cavity Squealer Tip in a Turbine Cascade in Comparison with Plane Tip Results: Part 2-Aerodynamic Loss," *Experiments in Fluids*, Vol. 49, pp. 713~723.
- (6) Li, W., Jiang, H., Zhang, Q. and Lee, S. W., 2014, "Squealer Tip Leakage Flow Characteristics in Transonic Condition," *ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. pp. 042601-1~042601-7.
- (7) Lee, S. W., Kim, S. U. and Kim, K. H., 2012, "Aerodynamic Performance of Winglets Covering the Tip Gap Inlet in a Turbine Cascade," *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 34, pp. 36~46.
- (8) Seo, Y. C. and Lee, S. W., 2013, "Tip Gap Flow and Aerodynamic Loss Generation in a Turbine Cascade Equipped with Suction-Side Winglets," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 17, pp. 703~712.
- (9) Cheon, J. H. and Lee, S. W., 2015, "Tip Leakage Aerodynamics over the Cavity Squealer Tip Equipped with Full Coverage Winglets in a Turbine Cascade," *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 56, pp. 60~70.
- (10) Lee, S. W., Cheon, J. H. and Zhang, Q., 2014, "The Effect of Full Coverage Winglets on Tip Leakage Aerodynamics over the Plane Tip in a Turbine Cascade," *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 45, pp. 23~32.
- (11) Lee, S. W. and Lee, S. E., 2014, "Tip Gap Flow Characteristics in a Turbine Cascade Equipped with Pressure-Side Partial Squealer Rims," *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 50, pp. 369~377.
- (12) Treaster, A. L. and Yocum, A. M., 1979, "The Calibration and Application of Five-Hole probes," *ISA Transactions*, Vol. 18, pp. 23~34.
- (13) Abernethy, R. B., Benedict, R. P. and Dowdell, R. B., 1985, "ASME Measurement Uncertainty," *ASME Journal of Fluids Engineering*, Vol. 107, pp. 161~164.