

터빈 동익 스퀸러팁 표면에서의 열(물질)전달 특성

문현석* · 이상우**†

Heat/Mass Transfer Characteristics on the Squealer Tip Surface of a Turbine Rotor Blade

Hyun Suk Moon*, Sang Woo Lee**†

Key Words : Turbine rotor blade(터빈 동익), Plane tip(평면팁), Squealer tip(스퀘러팁), Heat transfer(열전달)

ABSTRACT

The flow and heat/mass transfer characteristics on the squealer tip surface of a high-turning turbine rotor blade have been investigated at a Reynolds number of 2.09×10^5 , by employing the oil-film flow visualization and naphthalene sublimation technique. The squealer rim height-to-chord ratio and tip gap height-to-chord ratio are fixed as typical values of $h_{st}/c = 5.5\%$ and $h/c = 2.0\%$, respectively, for turbulence intensities of $Tu = 0.3\%$ and 15% . The results show that the near-wall flow phenomena within the cavity of the squealer tip are totally different from those over the plane tip. There are complicated backward flows from the suction side to the pressure side near the cavity floor, in contrast to the plane tip gap flows moving toward the suction side after flow separation/reattachment. The squealer tip provides a significant reduction in tip surface thermal load with less severe gradient compared to the plane tip. In this study, the tip surface is divided into six different regions, and transport phenomena at each region are discussed in detail. The mean thermal load averaged over the squealer cavity floor is augmented by 7.5 percents under the high inlet turbulence level.

1. 서론

가스터빈 엔진의 효율을 향상시키기 위해서는 터빈 입구온도를 높여야 하며, 현재 고성능 터빈의 입구 온도는 1500°C 에 이르고 있다. 이와 같이 높은 입구 온도 때문에 고온의 연소가스와 직접 접하는 터빈의 여러 구성 요소에 대한 냉각이 필수적이며, 이들 고온 부품 표면에서의 정확한 열부하(thermal load)를 알아야 적절한 냉각 시스템을 도입할 수 있다. 특히 동익의 팁(tip) 부분은 압력면, 흡입면, 팁 표면 등 세 면이

동시에 고온의 연소가스에 노출되어 열부하를 특히 많이 받고, 그 구조상 냉각이 용이하지 않아 파손의 위험이 크다. 현재 고압터빈 동익에는 평면팁(plane tip) 보다는 Fig. 1과 같은 스퀸러팁(squealer tip)이 많이 채용되고 있다. 이 스퀸러팁의 가장자리에는 스퀸러라고 불리는 울다리 형태의 돌출부가 있으며, 그 내부에 함몰된 빈 공간(cavity)이 존재한다. 팁 표면에서의 열전달특성에 대한 초창기의 연구는 터빈 익렬(cascade)이 아닌 이상화된 팁 모델에 대해 이루어졌다.^(1, 2) 최근 들어 Azad 등⁽³⁾은 비정상액정기법을 이용하여 터빈 동익 익렬의 평면팁 표면에서 열전달계수 분포를 측정하였다. Azad 등⁽⁴⁾은 Azad 등⁽³⁾과 동일한 익형에 대하여 스퀸러팁 표면에서의 열전달계수를 측정하여 평면팁 결과와 비교하였다. 이후 여러 종류의 변형된 스퀸

* 금오공과대학교 대학원

** 금오공과대학교 기계공학부

† 교신저자, E-mail : swlee@kumoh.ac.kr

러팁에 대해 팁 영역에서의 열전달 연구⁽⁵⁻⁶⁾가 이루어졌다.

본 연구에서는 대표적인 팁간극 높이(h) 및 스킨러 높이(h_{sk})에 대하여 고선회 터빈 동익 스킨러팁 표면에서의 유동 및 열전달 특성을 연구하고자 한다. 본 연구가 기존 스킨러팁 열전달 연구들⁽⁴⁻⁶⁾과 다른 점은 첫째로 스킨러팁 표면 전역에 걸친 자세한 유동의 가시화 연구를 통해 팁간극 내부에서 발생하는 복잡한 유동 현상을 상세히 규명하고, 둘째로 스킨러팁 표면을 유동 및 열(물질)전달 분포를 근거로 여섯 영역으로 분류하고 각 영역별 특성을 밝혔고, 세번째로 본 연구에서는 기존 연구의 터빈 동익에 비해 익형 통로에서 반동(reaction)에 의한 압력강하가 매우 작은 터빈 익형을 적용한 것이다.

2. 실험

2.1. 나프탈렌승화법

열전달의 연구에 있어서 열전달과 물질전달의 상사성을 이용한 실험방법이 널리 이용되고 있다. 나프탈렌승화법은 그 중 한 방법으로 열전달계와 똑같은 기하학적 형상으로 나프탈렌을 주조하여 일정시간 유동장에 노출시킨 뒤, 물질전달계에서 승화된 나프탈렌의 깊이를 측정하여 물질전달계수 h_m 를 구하고, 적절한 상사 관계식을 이용하여 열전달계수를 구하는 방법이다.⁽⁷⁾

일반적으로 Sherwood 수와 Nusselt 수의 관계는 다음과 같은 식으로 주어진다.

$$\frac{Nu}{Sh} = \left(\frac{Pr}{Sc} \right)^n \quad (1)$$

여기서 Pr은 Prandtl 수, Sc는 Schmidt 수이며, 상수 n은 대략 0.33 (층류유동) - 0.4 (난류유동) 정도의 값을 갖는다. 상온에서 공기의 Pr과 나프탈렌의 Sc는 각각 0.71과 2.28이다. 식 (1)의 Sh는 다음과 같은 식으로 정의된다.

$$Sh = \frac{h_m c}{D} \quad (2)$$

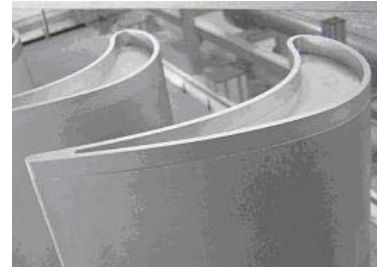


Fig. 1 Tested squealer tip

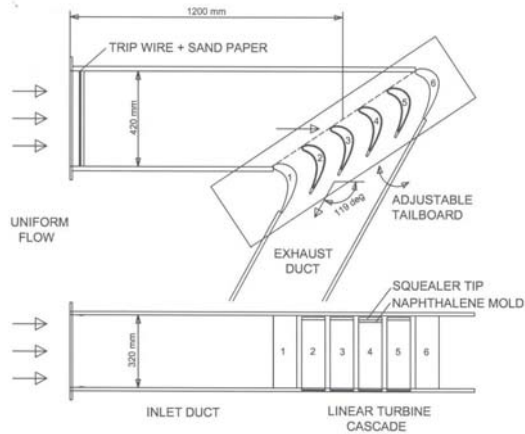


Fig. 2 Turbine cascade with tip clearance gap

식 (2)에서 D 는 공기 중에서의 나프탈렌확산계수이다.

2.2. 익렬 풍동 및 측정장치

본 연구에서 사용된 실험장치는 개방형 풍동, 입구 덕트, 터빈 익렬, 출구부 등으로 구성된다(Fig. 2). 고난류강도 실험의 경우 풍동 출구와 입구 덕트 사이에 연소기 모사형 난류발생기⁽⁸⁾를 설치하였다. 이 개방형 풍동을 통과한 균일 유동은 익렬 상류에 위치한 입구 덕트로 유입된다. 이 입구덕트의 단면은 420 mm × 320 mm이고, 폭방향 중심에서 그 길이는 1.2m이다. 이것의 입구 상하 벽에는 트립와이어/사포가 차례로 부착되어 있어서, 상하 벽에서 유동이 난류 경계층으로 발달된다.

입구덕트 하류에 설치된 터빈 익렬에는 총 6개의 선형 익형이 설치되어 있다. 이것은 산업용 가스터빈 엔진 터빈 제 1 단 동익의 미드코드(mid-chord) 형상을 근거로 제작되었다. Fig. 3에 익렬의 중요 제원이

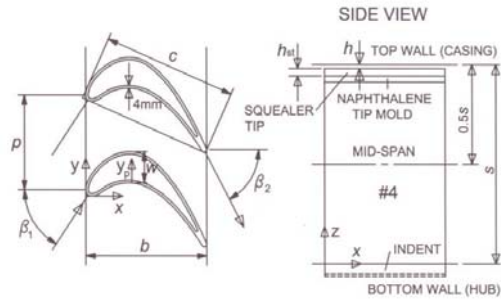
제시되어 있는데, 그 중 코드길이(c), 피치(p), 스펜(s) 등은 각각 217.8 mm, 151.6 mm, 320.0 mm 등이다. 본 연구에서 사용한 익형은 고선화 동익으로 그 선화각은 119도이며, Azad 등^(3, 4)의 97.71도에 비해 훨씬 더 크다. 이 선형 익형의 형상 좌표는 Lee와 Chae⁽⁹⁾에 자세히 기술되어 있다. 6개의 익형 중 #1과 #6 익형은 그 상하에 위치하는 알루미늄 판에 볼트로 고정되는 반면, 나머지 4개의 익형은 하판에 뚫려 있는 익형 단면 형상의 홈 내부에 삽입되어 볼트로 아랫벽에만 고정된다(Fig. 2). 따라서 틱간극은 익렬 상단에 존재하게 된다. 본 연구에서 사용된 스킨러팁의 형상은 Fig. 1과 같으며, 스킨러의 폭은 4.0 mm이고, 그 높이 h_{st} 는 12 mm이다(Fig. 3). 본 연구에서 사용한 xyz 좌표계에서는 하류 방향을 x -축, 폭(피치) 방향을 y -축, 그리고 높이(스팬) 방향을 z -축으로 설정하였다.

본 연구에서는 펜티엄-4 PC로 전체 측정시스템을 온라인화 하였으며, 이를 위해 A-D변환기(NI, PCI-MIO-16E-4), DI/O보드(NI, PCI-6503), GPIB 보드(NI, AT-GPIB)가 컴퓨터에 내장되어 있다. 압력변환기(MKS, 223BD-00010ACB)에 의해 변환된 압력신호는 12비트 A-D변환기를 통해 컴퓨터로 전달된다. 입구 난류강도의 측정에는 정온형 열선유속계(Kanomax, 1010)가 사용되었다. 각 측정 위치에서 나프탈렌 승화 깊이의 측정에는 선형가변차동변환기 즉 LVDT가 사용되었다. 이 LVDT (Sensotec, model 060-3590-02)의 최대 측정범위는 ± 1.0 mm이며 그 분해능은 $1\mu m$ 이다. 온도측정을 위하여 나프탈렌 주조면에는 T-형 열전대가 설치되었고, 열전대로부터의 전압 측정에는 디지털전압계(Keithley, 2001)와 GPIB 보드가 사용되었다. 이 열전대의 보정에는 항온조(Fisher Scientific, 9010)와 표준온도계가 이용되었다.

Fig. 4는 나프탈렌이 주조될 주형 모습을 보여 준다. 이 주형과 주형덮개는 모두 두랄루민으로 제작되었다. 용융된 나프탈렌은 뒷전에 설치된 주입구를 통해 주입된다. 따라서 주입구가 틱 간극의 유동에 거의 영향을 주지 않는다. 주형의 바닥에는 여러 개의 돌기를 가공하여 응고된 나프탈렌이 주형에 잘 부착되도록 하였다. 주조된 나프탈렌의 두께는 4 mm이며, 이 주형은 Fig. 2와 Fig. 3에서와 같이 #4 익형 상단에 설치된다.

2.3. 승화깊이 측정방법

팁 표면 주형에서 나프탈렌이 승화된 깊이를 측정



| | |
|--------------------------------|-----------|
| Number of blades | 6 |
| Chord length (c) | 217.8 mm |
| Axial chord (b) | 196.0 mm |
| Pitch (p) | 151.6 mm |
| Span (s) | 320.0 mm |
| Blade inlet angle (β) | 56.4 deg |
| Blade outlet angle (β) | -62.6 deg |

Fig. 3 Cascade data

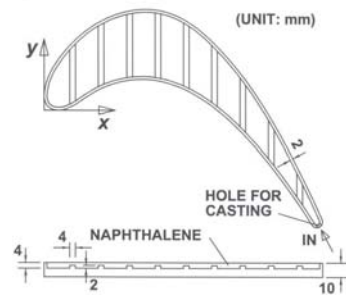


Fig. 4 Naphthalene tip mold

하기 위해서 주철정반, 3차원이송장치로 구성된 자동형상측정시스템을 사용하였다. 본 실험에서는 x -축 방향으로 50 위치, y -축 방향으로 13 위치 등 총 650 점에서 승화깊이가 측정되었다. 이 모든 위치에서 승화 깊이를 측정하는데 총 13분 정도가 소요되었다.

나프탈렌이 주조된 주형은 풍동에서의 노출 실험에 앞서, 형상측정시스템에 장착되어 각 측정 위치에서 나프탈렌 면의 기준치가 측정된다. 이렇게 1차 측정이 끝난 주형은 익렬(Fig. 2)의 주형 #4 상단에 설치되어 대략 90분 동안 유동장에 노출된다. 풍동 실험이 끝난 주형은 다시 이 형상측정시스템에 장착되어 각 측정 위치에서 2차 승화깊이 측정이 이루어진다. 이 승화깊이에는 1차 승화깊이 측정이 이루어진 이후 승화된 나프탈렌의 깊이, 주형을 익렬에 설치하는 동안 승화된 깊이, 풍동실험이 끝난 뒤 주형을 측정시스템에 설치

하는 동안 승화된 깊이, 이후 2차 깊이측정 전에 승화된 깊이 등이 모두 포함되어 있다. 따라서 순수하게 풍동 실험시 승화된 깊이를 구하기 위해서는 LVDT로 측정된 깊이에서 이들 값을 모두 빼 주어야 한다. 본 연구의 경우 나프탈렌의 최대 국소 승화깊이는 스킨러 팁 바닥 표면과 끝벽 사이 거리의 1.2%에 불과하였다. 풍동에서의 노출 실험시, 나프탈렌 표면 온도의 변화는 0.2℃ 이내였다.

2.4. 유동의 가시화

팁 표면에서의 정성적인 유동패턴을 이해하기 위하여 유막법(oil-film method)을 이용한 유동의 가시화 실험을 수행하였다. 본 실험에서는 흑연분말과 등유의 혼합물을 이용하여 가시화실험을 수행하였는데, 등유는 적당한 휘발성을 가지고 있으므로 실험이 끝난 뒤 윤활유와 같이 흘러내리지 않으면서 흑연가루의 궤적을 잘 나타내 준다.

2.5. 실험조건

본 연구에서는 자유유동속도를 15 m/s로 고정하고 실험을 수행하였다. 따라서 입구유동의 Reynolds 수 ($Re = U_{\infty}c/\nu$)는 2.09×10^5 이다. 입구 자유유동 난류강도 (Tu)는 0.3%와 15%이며, 끝벽 경계층에서의 배제두께는 각각 5.16 mm와 2.28 mm이었고, 운동량두께는 각각 4.04 mm와 1.92 mm이었다. 코드길이에 대한 팁간극의 비(h/c)는 실제 엔진에서의 조건을 고려하여 2.0%로 고정하였고, 스킨러의 높이는 $h_{st}/c = 5.5\%$ ($h_{st} = 12\text{mm}$)에 대하여 실험을 수행하였다. 본 연구에서는 Abernethy 등⁽¹⁰⁾의 방법으로 오차해석을 수행하였고, 그 결과 본 실험에서 Sh의 오차 범위는 $\pm 6.4\%$ 이었다.

3. 결과 및 검토

3.1. 평면팁

Fig. 5와 6은 각각 평면팁 표면에서 얻어진 유동가시화 결과와 국소 Sherwood 수 Sh의 분포를 보여 준다.⁽⁸⁾ Fig. 5에서 일점쇄선은 Sh가 최대인 점들을 연결한 궤적을 나타내며, I, II, III, IV는 유동 및 열(물질) 전달 분포를 바탕으로 분류된 네 영역들을 나타낸다.

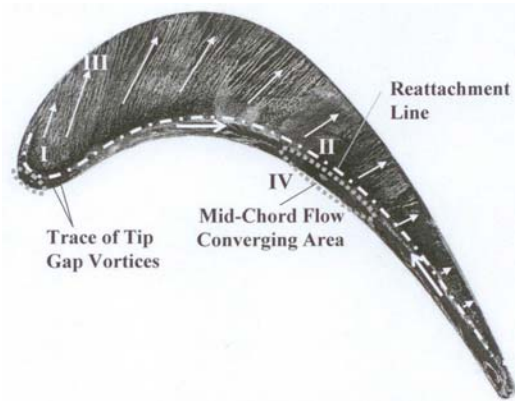


Fig. 5 Flow visualization for plane tip ($Tu = 0.3\%$)

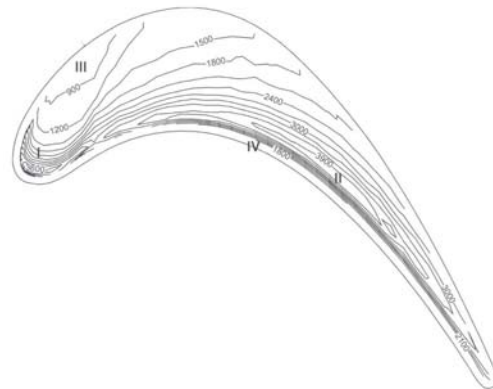


Fig. 6 Contours of Sh for plane tip ($Tu = 0.3\%$)

익형의 압력면 팁모서리를 넘어 팁간극 내부로 유입되는 유동은 직각 팁모서리에서 박리(separation)된 뒤 재부착(reattachment)된다. 이 재부착으로 인해 국소 열(물질)전달이 크게 증가하므로(Fig. 6의 영역 II), 일점쇄선은 재부착선과 거의 일치한다. 재부착된 유동은 Fig. 5에 표시된 바와 같이 화살표 방향으로 하류로 이동하면서 경계층 유동으로 발달된다. 압력면 팁모서리와 재부착선 사이의 박리버블 영역에는 Fig. 5에서 굵은 화살표로 표시한 바와 같이 익형의 선단과 끝단에서 미드코드 쪽으로 향하는 미세한 흐름이 관찰되었다. 이렇게 모인 흑연분말과 등유 혼합물은 타원으로 표시된 영역에 그대로 머물렀으며, 시간이 경과함에 따라 등유만이 증발하고 흑연분말은 그곳에 잔류하였다. 따라서 엄밀히 말해 유동의 재순환영역은 압력면 팁모서리와 재부착선 사이의 모든 영역이 아니라, 영역 IV 부근에 긴 타원으로 표시된 영역에만 국한된다.

이 유동의 재순환으로 인해 영역 IV에서는 열(물질)전달이 비교적 작게 나타났다(Fig. 6).

Fig. 5에서 익형의 앞전 근처의 유동의 가시화 결과를 자세히 관찰해 보면, 익형 앞전 틱모서리를 넘어 박리된 흐름의 rolling-up 현상으로 인해 영역 I에서 유동의 대칭선(캠버선)을 기준으로 압력면과 흡입면 쪽으로 1쌍의 와류로 발달된다.⁽⁸⁾ 이와 같은 1쌍의 와류는 틱간극와류라 불리며, 이 두 와류는 각각 압력면 틱간극와류와 흡입면 틱간극와류에 해당된다. Fig. 6에서 알 수 있듯이, 영역 I에서의 등 Sh 선은 틱모서리를 따라 초승달 형태로 나타난다. 이 사실은 캠버선을 중심으로 그 양쪽에서 1쌍의 틱간극와류가 존재함을 암시한다. 이 틱간극와류 하류에는 열(물질)전달이 매우 낮은 영역 III이 존재하는데 이곳의 Sh는 영역 I 근처 Sh의 1/4에 불과하였다(Fig. 6). 이와 같은 저열부하 영역이 존재하는 이유는 익형 앞전 틱모서리를 넘어 틱간극 내부로 진입하는 유동 중 대부분이 틱간극 와류에 편입되면서 그 하류 영역에서의 대류 열(물질)전달이 크게 감소하기 때문이다. 이와 같은 평면팁 표면에서의 결과는 Lee와 Moon⁽⁸⁾에 자세히 기술되어 있다.

3.2. 스켈러팁

Fig. 7은 스켈러팁 표면에서의 유동가시화 결과이다. 여기서 영문자 A, B, C, D, E, F는 이 유동가시화와 열(물질)전달 분포(Fig. 8)를 바탕으로 본 연구에서 분류된 6개의 영역들을 나타낸다. 평면팁 표면에서의 유동은 재부착선을 기준으로 박리버블과 경계층 발달 영역으로 구분되고 전체적인 유동의 방향은 압력면에서 흡입면 쪽으로 향하였다. 그런데 스켈러팁의 경우에는 팁 표면 근처 유동 방향이 크게 달랐다. Fig. 7에서 알 수 있듯이, 팁 표면에서의 유동은 오히려 흡입면에서 압력면 쪽으로 향하고 있으며, 위치에 따라 흐름의 방향이 매우 다양하였다. 영역 A 근처에서는 앞전 근처 스켈러에서 박리된 유동이 흡입면 쪽 스켈러 부근에서 팁 바닥면과 부딪혀 재부착되면서 흐름이 거의 정체된 형태의 유적 패턴을 보여 준다. 이 재부착된 유체는 팁 표면에서 영역 A로부터 앞전, 압력면, 뒷전 쪽으로 이동한다. 영역 B에서는 흡입면 스켈러로부터 거의 직각으로 멀어지는 유동이 관찰되는데, 이것은 압력면 스켈러에서 박리된 유동이 흡입면 스켈러 내벽에 부딪히면서 발생한다. 그러나 이 영역 B의 흐름은 앞전으



Fig. 7 Flow visualization for squealer tip ($Tu = 0.3\%$)

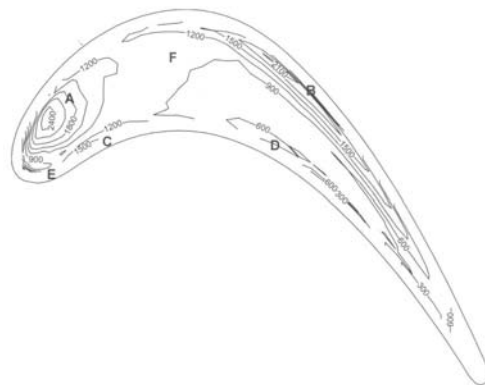


Fig. 8 Contours of Sh for squealer tip ($Tu = 0.3\%$)

로부터 밀려오는 강한 유동과 충돌하면서 방향이 뒷전 쪽으로 급격히 전환된다. 영역 C는 영역 A에서 압력면 쪽으로 이동한 흐름이 압력면 스켈러 내벽을 따라 하류로 이동하는 유로 부분이다. 영역 D는 스켈러팁 표면에서 앞전에서 뒷전으로 이동하는 유동이 익형의 곡률로 인한 원심력에 의해 압력면 스켈러로부터 멀어지고, 이에 따라 유속이 감소되는 영역이다. 앞전 스켈러 내벽 근처에 존재하는 영역 E에서는 유동의 재순환이 발생하는 영역으로 유적이 모인 상태에서 등유만 증발하여 매우 검게 보인다. 영역 F는 앞전 근처 상류 영역에서 스켈러팁 내부로 공급된 흐름이 뒷전 쪽으로 이동하는 주요 통로이다. 영역 F를 지난 유동은 영역 B의 흐름을 뒷전 쪽으로 향하게 한다. 이와 같은 각 영역에서의 유동 특성은 그곳에서의 열(물질)전달에 큰 영향을 미칠 것이다.

Fig. 8은 스켈러팁 표면에서의 Sh 분포이다. 스켈러

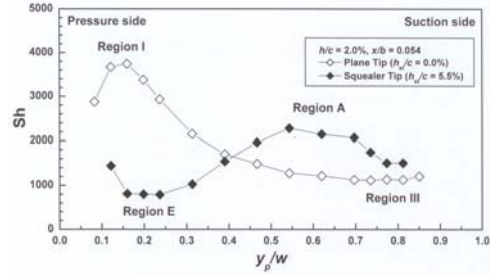
가 존재할 경우 팁 표면에서의 열부하는 일반적으로 크게 감소하였고, 열(물질)전달 분포도 매우 달랐다. 평면팁의 경우 Sh 의 최대치는 영역 II에서 3900 정도로 매우 컸지만, 스켈러팁의 경우 영역 A에서 2400 정도에 머물렀다. 영역 A 근처에서는 앞전 및 압력면 쪽 스켈러에서 박리된 유동이 팁 바닥 표면과 부딪혀 재부착되므로 Sh 가 가장 크게 나타났다. 압력면 스켈러에서 박리된 유동이 흡입면 스켈러 내벽에 부딪히는 곳인 영역 B에서도 열부하가 높게 나타났으며, 영역 A에서 압력면 쪽으로 이동한 흐름이 압력면 스켈러 내벽을 따라 이동하는 영역 C에서도 Sh 가 조금 더 높았다. 이와는 달리 영역 D에서는 대류 열(물질)전달이 가장 낮았다. 앞전 스켈러 내벽 근처에서 유동의 재순환이 발생하는 영역 E에서도 Sh 가 비교적 낮게 나타났다. 스켈러팁 내부의 흐름이 앞전 근처 상류 영역에서 뒷전으로 이동하는 주요 통로에 해당하는 영역 F에서는 Sh 가 중간 정도의 값을 가지며, 그 값이 매우 넓은 면적에 걸쳐 균일하게 나타났다.

전체적으로 볼 때 평면팁 대비 스켈러팁 표면의 평균 열부하가 46% 정도에 불과하였으므로, 압력손실 저감⁽⁹⁾ 측면과 함께 팁 바닥 표면에서의 열부하의 감소 측면에서도 스켈러팁이 더 유리함을 확인할 수 있다.

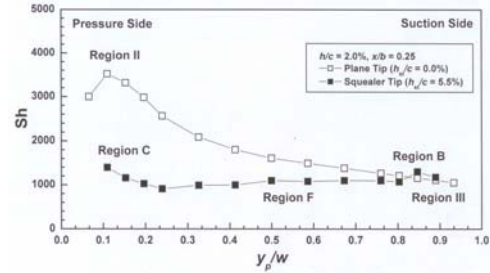
3.3. 평면팁과 스켈러팁 결과의 비교

Fig. 9는 x/b 가 0.054, 0.25, 0.50, 0.75일 때, 평면팁과 스켈러팁에서 Sh 의 y -축(피치) 방향 변화를 직접적으로 비교한 것이다. 여기서 y_p 는 Fig. 3에서와 같이 압력면 팁 모서리에서 $+y$ -축 방향으로 정의된 피치방향 좌표이며, w 는 압력면 팁모서리와 흡입면 팁모서리 사이의 거리이다. 평면팁의 경우 x/b 에 관계없이 y_p/w 가 증가함에 따라, 즉 압력면 쪽에서 흡입면 쪽으로 이동함에 따라, Sh 는 급격하게 증가하여 최대가 된 후 완만하게 감소하는 경향을 보인다. 이와는 달리 스켈러팁 표면에서는 x/b 에 따라 Sh 의 변화 경향이 매우 다르게 나타났다.

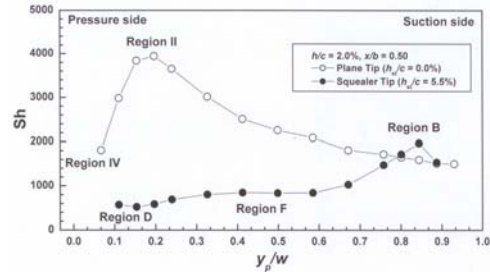
x/b 가 0.054인 경우(Fig. 9(a)), 스켈러팁 표면에서는 영역 E에 해당하는 곳에서 Sh 가 1000 이하로 비교적 작은 값을 가지며, 이곳에서 흡입면 쪽으로 이동함에 따라 Sh 가 증가하여 영역 A에서 최대가 된 후 다시 감소한다. 반면에 평면팁에서는 팁간극와류의 존재로 인해 영역 I 근처에서 Sh 가 대략 4000 정도에 이른 후, 이후 급격히 감소하여 영역 III에 이르면 Sh 의 피



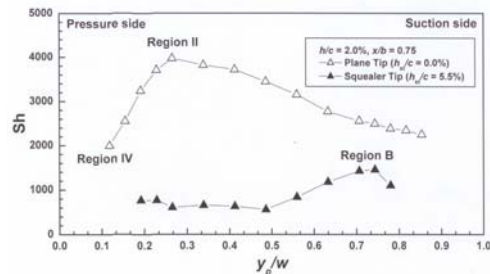
(a) $x/b = 0.054$



(b) $x/b = 0.25$



(c) $x/b = 0.50$



(d) $x/b = 0.75$

Fig. 9 Profiles of Sh for squealer tip ($Tu = 0.3\%$)

치방향 변화가 거의 없어진다. x/b 가 0.25인 경우(Fig.9(b)), 평면팁 표면에서는 $x/b = 0.054$ 의 Sh 변화 경향이 그대로 유지된다. 그러나 스켈러팁 표면에서는 영역 C에 해당하는 곳에서 Sh 가 조금 높게 나타나고, 이후 영역 F에서 거의 일정하게 유지된 뒤 영역 B에

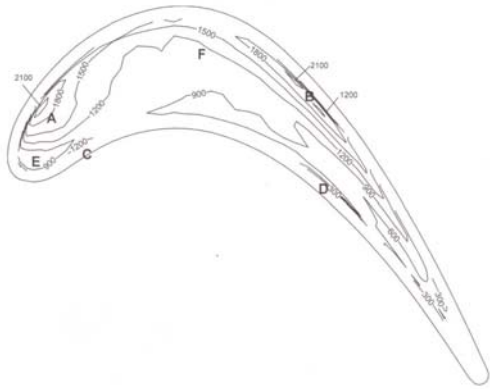


Fig. 10 Contours of Sh for squealer tip ($Tu = 15\%$)

이르러 조금 증가 후 감소한다. x/b 가 0.50인 경우(Fig. 9(c)), 스킨러팁 표면에서는 압력면 모서리 근처 영역 D에서 Sh가 최소가 된 뒤, 영역 F에서 Sh는 거의 일정해지며, 흡입면에 근접할수록 Sh가 크게 증가하여 영역 B에서 최대값을 갖는다. 이와 같이 흡입면 근처에서 Sh가 최대가 되는 현상은 x/b 가 0.75에서도(Fig. 9(d)) 그대로 유지되었다.

스킬러팁 표면에서의 Sh는 Fig. 9(a)의 영역 A 근처를 제외하면 거의 대부분의 영역에서 평면팁의 Sh에 비해 작은 값을 갖게 되며, 일반적으로 압력면보다는 흡입면 쪽의 열부하가 더 크게 나타났다. 이것은 압력면 근처에서 Sh의 최대값이 존재하는 평면팁과는 근본적으로 다른 것이다.

3.4. 입구 난류강도의 영향

Fig. 10은 입구 난류강도가 15%일 때 Sh의 분포를 보여 준다. 이 고난류 입구유동 조건의 경우에도 전체 영역이 A, B, C, D, E, F 등의 여섯 영역으로 구분된다. 이 결과를 Fig. 8의 결과와 비교하면, 입구 난류강도가 크면 Sh의 구배가 감소하고 대체로 열부하의 집중이 완화되는 경향을 보인다. 스킨러팁 바닥 표면 전체에 걸쳐 평균낸 Sh는 고난류강도 조건에서 대략 7.5% 정도 더 높았다. 입구 난류강도에 의한 열부하의 증가가 이와 같이 비교적 작은 이유는 스킨러팁 내부의 흐름 자체가 이미 압력면에서의 박리에 의해 충분히 교란되어 있기 때문으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 입구 난류강도가 0.3%와 15%일 때, 대표적인 팁간극과 스킨러 높이($h/c = 2.0\%$, $h_{st}/c = 5.5\%$)를 갖는 터빈 동익 스킨러팁 표면에서 유동 및 열(물질)전달 특성 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 평면팁 표면에서의 유동과는 달리, 스킨러팁 표면에서의 유동은 대부분 흡입면에서 압력면 쪽으로 향하거나, 앞전에서 뒷전 방향으로 이동하였다.
- (2) 스킨러팁 표면에서 열부하는 앞전 근처 스킨러에서 박리된 흐름이 팁 바닥면에 직접 재부착되는 영역과 미드코드 근처 압력면 스킨러에서 박리된 유동이 흡입면 스킨러 내벽과 부딪히는 곳의 인접 영역에서 가장 심하게 나타났다.
- (3) 스킨러팁 바닥 표면에서의 열부하는 평면팁 대비 46% 정도에 불과하였고, 국소적인 열부하 집중도도 현저히 낮았다.
- (4) 입구 난류강도의 증가는 스킨러팁 바닥 표면에서의 열부하를 소폭 증가시켰으나, 정성적인 열부하 분포에는 큰 변화가 없었다.

후 기

본 연구는 금오공과대학교 학술연구비에 의하여 연구된 논문입니다.

참고문헌

- (1) Mayle, R. E., and Metzger, D. E., 1982, "Heat Transfer at the Tip of an Unshrouded Turbine Blade," *Proceedings of 7th International Heat Transfer Conference*, Vol. 3, pp. 87~92.
- (2) Chyu, M. K., Moon, H. K., and Metzger, D. E., 1989, "Heat Transfer in the Tip Region of Grooved Turbine Blades," *ASME Journal of Turbomachinery*, Vol. 111, pp. 131~138.
- (3) Azad, Gm. S., Han, J.-C., Teng, S., and Boyle, R. J., 2000, "Heat Transfer and Pressure Distributions on a Gas Turbine Blade Tip,"

- ASME *Journal of Turbomachinery*, Vol. 122, pp. 717~724.
- (4) Azad, Gm. S., Han, J.-C., and Boyle, R. J., 2000, "Heat Transfer and Pressure Distributions on the Squealer Tip of a Gas Turbine Blade," *ASME Journal of Turbomachinery*, Vol. 122, pp. 725~732.
- (5) Papa, M., Goldstein, R. J., and Gori, F., 2003, "Effect of Tip Geometry and Tip Clearance on the Mass/Heat Transfer From a Large-Scale Gas Turbine Blade," *ASME Journal of Turbomachinery*, Vol. 125, pp. 90~96.
- (6) Nasir, H., Ekkad, S. V., Kontrovitz, D. M., Bunker, R. S., and Prakash, C., 2004, "Effect of Tip Gap and Squealer Geometry on Detailed Heat Transfer Measurements over a High Pressure Turbine Rotor Blade Tip," *ASME Journal of Turbomachinery*, Vol. 126, pp. 221~228.
- (7) Goldstein, R. J. and Cho, H. H., 1995, "A Review of Mass Transfer Measurements Using Naphthalene Sublimation," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 10, pp. 416~434.
- (8) Lee, S. W. and Moon, H. S., 2008, "Heat Transfer Characteristics on the Tip Surface of a High-Turning Turbine Rotor Blade," *Trans. of KSME (B)*, Vol. 32, pp. 207~215.
- (9) Lee, S. W. and Chae, B. J., 2008, "Effect of Squealer Rim Height on Aerodynamic Losses Downstream of a High-Turning Turbine Rotor Blade," *Experimental Thermal and Fluid Science*, pp. Vol. 32, 1440~1447.
- (10) Abernethy, R. B., Benedict, R. P. and Dowdell, R. B., 1985, "ASME Measurement Uncertainty," *ASME Journal of Fluids Engineering*, Vol. 107, pp. 161~164.