

가스 터빈 블레이드 팁과 그 주변에서의 열전달 계수

곽재수[†]

Heat Transfer Coefficients on a Gas Turbine Blade Tip and Near Tip Regions

Jae Su Kwak

Key Words : Heat transfer (열전달), Turbine(터빈), Blade tip(블레이드 팁)

Abstract

Detailed heat transfer coefficient distributions on a gas turbine blade tip were measured using a hue-detection base transient liquid crystals technique. The heat transfer coefficients on the shroud and near tip regions of the pressure and suction sides of a blade were also measured. Both plane tip and squealer tip blade were considered. The heat transfer measurements were taken at the three different tip gap clearance of 1.0%, 1.5%, and 2.5% of blade span. Results show the overall heat transfer coefficients on the tip and shroud with squealer tip blade were lower than those with plane tip blade. However, the reductions of heat transfer coefficients near the tip regions of the pressure and suction sides were not remarkable.

기호설명

C	팁 간극 (tip clearance gap)
h	열전달 계수(W/m ² K)
H	캐비티 깊이(0.508 cm)
k	열전도계수 (0.18 W/m K)
PS	블레이드 압력면
t	색깔 변화 시간 (초)
T _i	블레이드 표면의 초기온도 (°C)
T _m	캐스케이드 입구에서의 주유동 온도 (°C)
T _w	액정의 색깔 변화 온도 (°C)
SS	블레이드 흡입면
x	축거리 (cm)
α	열확산율 (1.25x10 ⁻⁷ m ² /s)

1. 서론

가스터빈의 출력과 효율을 증가시키기 위해 가스 터빈의 입구온도를 점점 증가시키는 경향에 의해, 터빈 내 각 부품들의 열부하도 점점 커지고 있다. 특히 블레이드 팁은 높은 열부하와 냉각의 어려움 때문에 터빈 내에서도 열전달 문제가 심각

한 부분이다. Shroud 가 없는 터빈에서는 블레이드 팁과 shroud 사이에 간극이 있는데, 이 간극은 팁 간극(tip clearance)이라 불린다. 블레이드의 압력면과 흡입면의 압력차이로 인해 높은 온도의 연소가스가 이 간극을 통해 흐르게 되는데, 이러한 shroud 와 블레이드 팁 사이의 유동을 tip leakage flow 라 부른다. Tip leakage flow 는 얇은 경계층을 형성하며 블레이드 팁에 높은 열전달 계수를 야기시켜 블레이드 팁의 파손에 주요한 요인이 된다. Tip leakage flow 와 블레이드 팁으로의 열전달을 줄이기 위해 현대의 가스터빈 블레이드 팁에는 홈(groove)이나 장애물 (rim)을 설치한다. 이러한 블레이드를 squealer tip blade 라 부르는데, 팁의 홈이나 장애물은 유동 저항으로 작용하여 leakage flow 를 줄일 수 있다.

최근 들어 블레이드 팁에서의 열전달 현상에 대한 많은 연구들이 발표되었다. Bunker 등⁽¹⁾은 액정을 사용하여 블레이드 팁 표면의 열전달 계수를 측정하였다. 그들은 3 가지 팁 간극과 두 가지 주유동의 난류강도, 그리고 두 가지의 모서리 형상에 대해 열전달을 측정하였다. Bunker 와 Bailey⁽²⁾는 캐비티 깊이와 블레이드 팁의 산화(oxidation)가 열전달에 미치는 영향을 연구하였다. 그 결과 캐비티 깊이의 영향은 캐비티 표면 전체에 걸쳐 일

[†] 한국항공우주연구원 항공추진그룹

E-mail : jskwak@kari.re.kr

TEL : (042)860-2028 FAX : (042)860-2626

정하게 나타나지 않았지만, 대체로 깊은 캐비티의 경우가 낮은 열전달 계수를 나타냄을 보였다. 그리고 블레이드 팁의 열전달 계수는 팁 간극의 크기에 큰 영향을 받지 않음을 보였다. Azad 등^(3,4,5)은 액정을 사용하여 팁 간극의 크기, 주유동의 난류강도, 다양한 팁 형상이 블레이드 팁의 열전달 계수 분포에 미치는 영향을 연구하였다. 그들은 주유동의 난류강도가 커질수록 블레이드 팁에서의 열전달 계수는 증가하고 블레이드 팁 형상이 바뀌에 따라 열전달 계수의 분포도 바뀐다는 것을 보였다. 그리고 블레이드 흡입면에 squealer rim 을 설치한 경우가 가장 낮은 블레이드 팁 열전달 계수를 나타냄을 보였다. Rhee⁽⁶⁾등은 나프탈렌 승화법을 이용하여 shroud 에서의 물질/열전달 현상을 연구하였는데 팁 간극의 크기에 따라 물질/열전달 현상의 특징이 많이 달라짐을 보였다. Jin 과 Goldstein^(7,8)은 고압 터빈 블레이드를 모사한 모델에서 나프탈렌 승화법을 이용하여 팁과 그 주변에서의 물질 전달 현상을 연구하였다. 그들은 팁에서의 물질/열전달 계수는 블레이드의 압력면이나 흡입면에 비해 월등히 높음을 보였다.

본 연구에서는 hue 검출 방식의 transient liquid crystals technique 를 사용하여 블레이드의 팁 뿐만 아니라 블레이드 팁 근처의 압력면, 흡입면 그리고 shroud 에서의 열전달 계수를 측정하였다. 또 2 개의 팁 형상과 각각 3 개의 팁 간극의 크기가 열전달 계수 분포에 미치는 영향을 살펴보았다. 본 연구의 결과는 공개된 실험 결과가 많지 않은 블레이드 팁과 그 주변에서의 열전달 계수 분포를 제공하여 블레이드 팁 주변 영역에서의 열전달 현상의 이해를 돕고, 추후 전산 해석의 기본 데이터로 활용될 수 있을 것으로 예상된다.

2. 실험 장치

Fig.1 은 blow-down 실험 장치의 개략도를 나타낸다. 실험 장치는 5 개의 선형 블레이드를 가진 캐스케이드로 구성되었다. 탱크에 저장된 압축 공기는 유압 밸브를 통해 캐스케이드로 유입되면 밸브 컨트롤러가 하류의 압력값을 feedback 받아 캐스케이드 내의 주유동 속도를 희망하는 값의 $\pm 3\%$ 이내로 조절할 수 있도록 하였다. 캐스케이드 입구의 크기는 가로 31.1cm, 세로 12.2cm 이고 아래, 위, 옆면은 1.27cm 두께의 투명 폴리카보네이트 판으로 만들어 졌다. 캐스케이드 위 판은 1.27cm 두께의 투명 아크릴로 만들어져 시각적 투시도를 확보하였다. 각 유로의 유동 주기성 확보

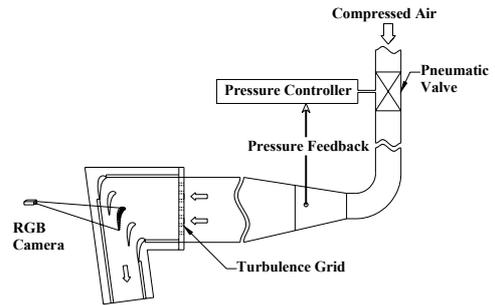


Fig.1 Schematic of blow-down facility

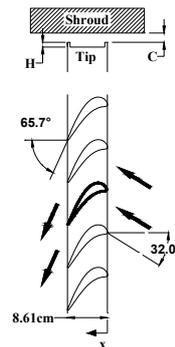


Fig.2 Definition of blade tip and shroud

를 위해 두 개의 움직일 수 있는 판(tailboard)을 블레이드 뒷전에 설치하였다. 주 유동의 난류강도를 높이기 위해 57%의 다공율(porosity)을 갖는 격자를 가운데 블레이드의 26.7cm 상류에 설치하여 9.7%의 난류 강도를 얻었다. Fig. 2 는 블레이드 팁과 shroud 의 정의를 나타낸다. 본 연구에 사용된 팁 간격의 크기는 1.31mm, 1.97mm, 그리고 3.29mm 로 각각 블레이드 스패의 1.0%, 1.5%, 그리고 2.5%에 해당한다. 팁 간격의 크기를 조절하기 위해 단단한 개스킷을 캐스케이드의 옆면과 바깥에 위치한 두 개의 블레이드, 그리고 블레이드 뒷전에 위치한 tailboard 위에 설치하였다.

테스트 중의 캐스케이드 입출구 속도는 각각 85m/s, 199m/s 이고 블레이드 축코드 길이와 캐스케이드 출구 속도로 계산된 레이놀즈수는 1.1×10^6 이었다. 캐스케이드 입구의 전압(total pressure)은 126.9kPa, 출구의 정압은 102.7kPa 로 총압력비(overall pressure ratio)는 1.2 였다. 유동 주기성 등의 자세한 유동 조건은 Azad 등^(3,4,5)에 자세히 설명되었다.

Fig. 3 은 열전달 측정을 위한 블레이드를 나타낸 것이다. 블레이드의 스패는 12.2cm 이고 축코드는 8.61cm 이다. 블레이드의 아래 부분은 알루미늄으로 만들어졌고 팁 부분은 열전도가 낮은 폴리카보네이트로 만들어졌다. 블레이드의 아래 부분에는 카트릿지 히터를 삽입할 수 있는 3 개의 공간

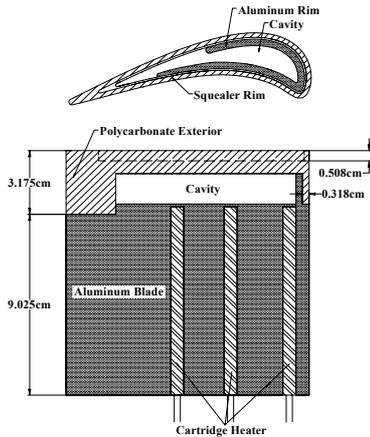


Fig. 3 Heat transfer measurement blade

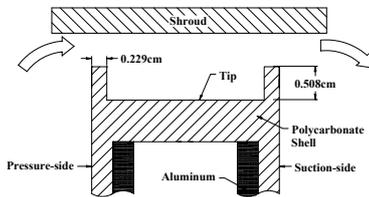


Fig. 4 Detailed view of the blade tip

이 있다. 카트릿지 히터가 알루미늄 코어를 가열하고 연속적으로 폴리카보네이트 팁을 가열할 수 있도록 하였다. Fig. 4 는 블레이드 팁의 형상 (squealer 팁의 경우)을 나타낸 것이다. Squealer 팁의 경우 rim 의 높이와 두께는 각각 0.508cm, 0.229cm 이다. Shroud 열전달 계수 측정 시험의 경우, 이동 가능한 300W 의 평면 히터가 사용되어 실험 직전에 제거되었다.

3. 열전달 계수 측정 이론

열전달 계수의 측정에는 hue 검출 방식의 transient liquid crystals technique 이 사용되었다. 액정 (liquid crystals)이 뿌려진 표면의 열전달 계수는 실험 표면을 one-dimensional semi-infinite solid 로 가정하여 계산할 수 있다. 표면에서 대류 경계 조건을 갖는 one-dimensional, semi-infinite solid model 의 표면에서의 해는 다음과 같이 표현된다. (3,4,5)

$$\frac{T_w - T_i}{T_m - T_i} = 1 - \exp\left(\frac{h^2 at}{k^2}\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{h\sqrt{at}}{k}\right) \quad (1)$$

식(4)에서 측정 표면의 초기 온도(T_i), 주유동의 온도(T_m), 액정의 색깔 변화 온도(T_w) 그리고 초기 온도에서 액정의 색깔 변화 온도까지의 시간(t)을 알면 열전달 계수(h)를 계산할 수 있다. 만약 주유

동의 온도가 시간에 따라 변하면 그 변화를 스텝 변화로 가정하고 Duhamel's Superposition Theorem 을 사용하여 식(1)을 다음과 표현할 수 있다.

$$T_w - T_i = \{T_{m,0} - T_i\} \times F\left(\frac{h\sqrt{at}}{k}\right) + \sum_{i=1}^n \left[F\left(\frac{h\sqrt{\alpha(t-\tau_i)}}{k}\right) \Delta T_{m,i} \right] \quad (2)$$

여기서, $F(x) = 1 - \exp(x^2) \operatorname{erfc}(x)$

$\Delta T_m =$ 주유동 온도의 스텝 변화

본 연구에서는 주유동 온도가 시간에 따라 변화하므로 식(2)를 이용하여 각 지점에서의 열전달 계수를 구하였다.

본 연구에서의 실험 오차는 Kline and McClintock⁽⁹⁾이 제시한 방법으로 계산되었다. 각각 실험값에 대한 오차는 색깔 변화 시간($\Delta t = \pm 0.5$ 초), 주유동 온도($\Delta T_m = \pm 0.5^\circ\text{C}$), 액정의 색깔 변화 온도 ($\Delta T_w = \pm 0.2^\circ\text{C}$), 표면의 초기 온도($\Delta T_i = \pm 1^\circ\text{C}$), 블레이드 재질의 물성치($\Delta \alpha/k^2 = \pm 5\%$)이고 계산된 총 실험 오차는 $\pm 8\%$ 이다.

4. 열전달 계수 측정과 결과

열전달 계수 측정을 위해 두 종류의 액정이 사용되었다. 20°C bandwidth 액정(R34C20W, Hallcrest)은 표면의 초기 온도를 측정하기 위해 사용되었고, 4°C bandwidth 액정(R29C4W, Hallcrest)은 액정의 색깔 변화 시간을 측정하기 위해 사용되었다. 초기 온도 측정을 위해 실험 대상 표면에 검은색 페인트 (BB-G1, Hallcrest)와 20°C bandwidth 액정을 균일하게 뿌린 후 카트릿지 히터에 전원을 공급하였다. 실험 대상 표면 온도가 원하는 온도 (약 70°C) 까지 가열된 후, 액정의 색깔을 RGB CCD 카메라와 24bit 이미지 캡처 보드를 이용하여 컴퓨터에 저장하였다. 저장된 이미지의 각각의 픽셀에서 미리 보정된 hue-온도의 관계식을 이용하여 초기 표면 온도를 계산하였다. Fig. 5 는 squealer 팁, $C=1.5\%$ 경우의 팁에서의 초기 표면 온도 분포를 나타낸 것이다. 초기 표면 온도의 측정이 끝난 후, 20°C bandwidth 액정을 제거하고 검은색 페인트와 4°C bandwidth 액정을 실험 대상 표면에 뿌린 후, 히터의 전원을 공급하여 블레이드 내부와 shroud 에 부착된 열전대로 측정된 기준 온도가 초기 표면 온도 측정 때와 동일할 때까지 블레이드를 가

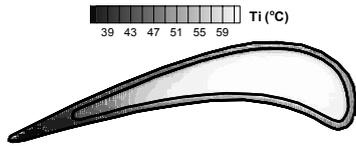


Fig.5 Initial temperature on the squealer tip for C=1.5%

열하였다. 측정된 기준 온도가 원하는 값이 도달하면 히터를 끄고 유동 조절 밸브를 열어 압축 공기를 흐르게 하였다. 이 때의 액정의 색깔 변화를 초당 30 프레임의 속도로 컴퓨터에 저장하였다. 실험의 지속 시간은 1 차원 열전달의 가정이 유효하도록 하기 위해 10~30 초 정도로 제한하였다. 컴퓨터에 저장된 모든 이미지에서 각각의 픽셀에서 hue 를 계산하고 이를 이용하여 초기 조건 (40~60°C)에서 주어진 hue 값(50)에 해당하는 온도 (팁과 shroud 의 경우 29°C, 압력면과 흡입면의 경우 29.6°C)까지 변화하는데 걸리는 시간(t)을 계산한 후, 식(2)에 대입하여 각 픽셀에서의 대류 열전달 계수 h 를 계산하였다.

4.1 팁에서의 열전달 계수

Fig. 6 은 plane 팁 표면에서의 열전달 계수 분포를 나타낸 것이다. 모든 팁 간극의 경우에서 코드의 20~70% 영역에서 높은 열전달 계수가 나타나는 것을 볼 수 있는데, 높은 열전달 계수의 영역은 팁의 압력면 부근에서 시작하여 흡입면 쪽으로 갈수록 그 값이 작아지는 것을 볼 수 있다. 또 압력면에 아주 가까운 부근에서는 상대적으로 낮은 열전달 계수를 볼 수 있는데(특히 C=2.5% 경우), 이것은 leakage flow 가 팁과 shroud 사이에 유입되면서 블레이드 팁 표면에서 박리와 재부착되면서 나타나는 현상이다. 팁 간극이 커질수록 압력면에 아주 가까운 부분의 열전달 계수가 감소하는 것을 볼 수 있는데, 이는 팁 간극 크기의 증가에 따라 박리영역(낮은 열전달 계수 영역)이 더 커지기 때문이다. 팁 간극의 크기가 커짐에 따라 전체적인 열전달 계수의 값은 증가하였다. 팁에서의 열전달 계수의 크기는 600~1300 W/m²K 이다.

Fig. 7 은 squealer 팁 표면에서의 열전달 계수 분포를 나타낸 것이다. Rim 에 가까운 부분은 rim 의 그림자에 때문에 실험 결과를 얻을 수 없었다. Plane 팁과 비교할 때, 전체적인 열전달 계수의 크기는 상당히 낮아진 것을 볼 수 있다. 하지만 squealer rim 에서의 열전달 계수는 plane 팁의 높은 열전달 계수와 비슷한 값을 보였다. Squealer 팁의 경우 캐비티 표면의 열전달 계수는 rim 의 열전달 계수에 비해 낮은 값을 보였다. 블레이드 흡입면

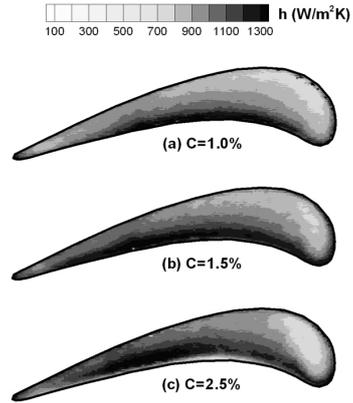


Fig. 6 Heat transfer coefficient on the plane tip

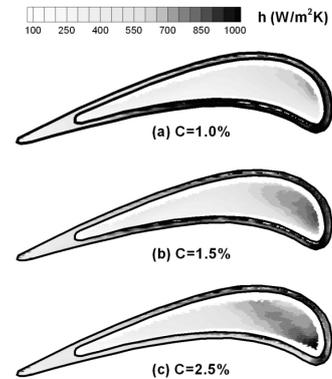


Fig. 7 Heat transfer coefficient on the squealer tip

에 가까운 캐비티 표면은 비교적 높은 열전달 계수를 나타내는 반면 압력면에 가까운 캐비티 표면은 비교적 낮은 값을 보이는데, 이는 leakage flow 가 압력면 rim 에서 박리가 되고 흡입면 근처에서 재부착되고 압력면 rim 부근에서 재순환(recirculation)영역을 형성하기 때문이다. 뒷전 쪽의 캐비티 표면은 낮은 열전달 계수 값을 나타내는데, 이는 캐비티의 폭이 작아짐에 따라 재순환 유동의 영향이 더 커져서 나타나는 현상이다. 캐비티 폭이 넓은 앞전 부근에서는 leakage flow 가 캐비티 표면에 재부착되면서 높은 열전달 계수 값이 나타난다. 팁 간극이 커짐에 따라 전체적인 열전달 계수는 증가하는 것을 볼 수 있다.

4.2 Shroud 에서의 열전달 계수

Fig. 8 과 9 는 shroud 에서의 열전달 계수 분포를 나타낸 것이다. Plane 팁의 경우, 블레이드 코드의 20~70% 영역에 높은 열전달 계수가 나타나고 앞전 근처에서는 그 값이 낮은 것을 볼 수 있는데, 이는 팁의 열전달 계수 분포 경향과 일치한다. 두 팁 형상의 경우 모두가 높은 열전달 계수 영역은 블레이드 압력면 위쪽에서 시작하는데, 이것은

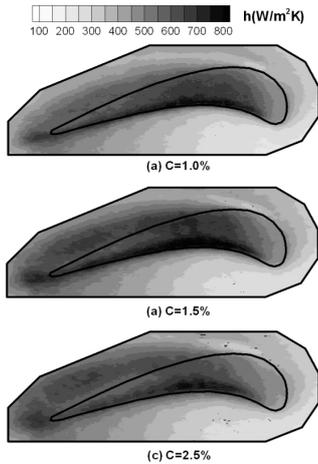


Fig.8 Heat transfer coefficient on the shroud with plane tip

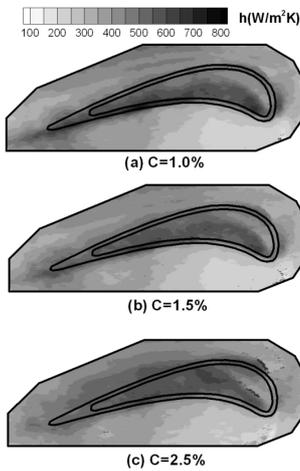


Fig.9 Heat transfer coefficient on the shroud with squealer tip

leakage flow 가 블레이드 압력면 쪽에서 팁 간극으로 들어올 때의 entrance effect 에 기인한다. Plane 팁의 경우 팁 간극의 크기가 커질수록 높은 열전달 계수 영역이 흡입면 하류로 커지는 것을 볼 수 있고, squealer 팁의 경우 팁 간극의 증가에 따라 전체적인 열전달 계수도 증가하는 것을 볼 수 있다. Squealer 팁의 경우는 plane 팁의 경우에 비해 낮은 열전달 계수 값을 보이는 것을 알 수 있다. Shroud 에서의 최대 열전달 계수는 plane 팁의 경우는 약 $800\text{W/m}^2\text{K}$ 이고 squealer 팁의 경우는 약 $700\text{W/m}^2\text{K}$ 으로, 각각의 팁 표면에서의 최대 열전달 계수에 각각 약 65%~70%이다.

4.3 압력면에서의 열전달 계수

Fig. 10 과 11 은 팁 근처 압력면의 열전달 계수 분포를 나타낸 것이다. 열전달 측정 영역은 팁에서 약 2.5cm 정도이고, 이 것은 블레이드 스패의 약 20%에 해당한다. 두 경우 모두 비슷한 열전달

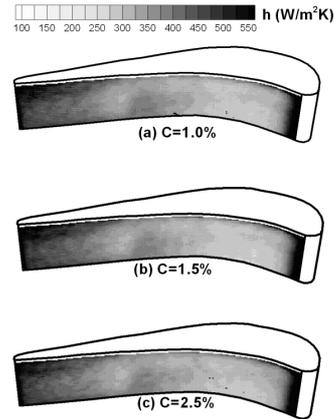


Fig.10 Heat transfer coefficient on the pressure side with plane tip

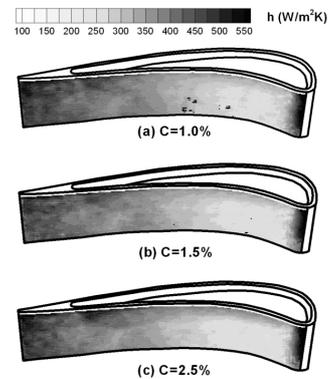


Fig.11 Heat transfer coefficient on the pressure side with squealer tip

계수 분포와 값을 나타내는 것을 볼 수 있는데, 이는 압력면의 열전달 계수의 분포는 팁의 형상에 크게 영향을 받지 않는다는 것을 보이는 것이다. 열전달 계수는 앞전 근처에서 높은 값을 보이고 뒷전 쪽으로 갈수록 낮아지다가 뒷전 근처에서 다시 높은 값을 보인다. 이는 블레이드 압력면에서의 경계층이 난류로 천이되면서 일어나는 현상이다. 열전달 계수의 스패 방향 분포는 일정함을 볼 수 있다. 팁에 가까운 압력면에서는 팁 모서리를 따라 비교적 높은 열전달 계수가 나타나는데 이것은 leakage flow 의 entrance effect 에 기인한다. 두 경우 모두 팁 간극 크기에 증가에 따른 열전달 계수 분포의 변화는 그리 크지 않았다. 팁 근처 압력면에서의 최대 열전달 계수의 값은 약 $550\text{W/m}^2\text{K}$ 로 팁에서의 최대 열전달 계수에 비해 약 45~55%에 해당한다.

4.4 흡입면에서의 열전달 계수

Fig. 12 와 13 은 팁 근처 흡입면에서의 열전달 계수 분포를 나타낸 것이다. 측정 영역의 크기는

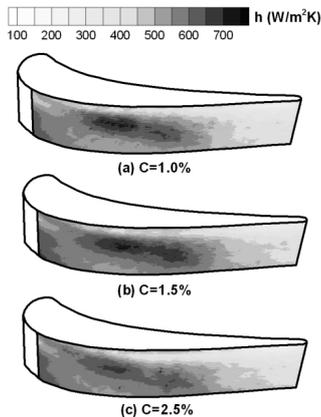


Fig.12 Heat transfer coefficient on the shroud with plane tip

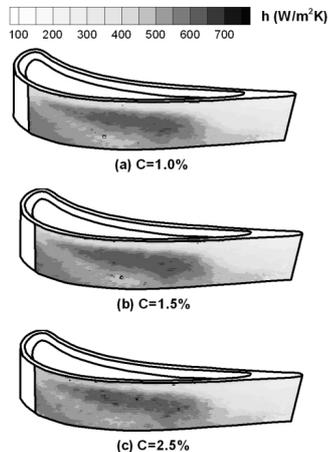


Fig.13 Heat transfer coefficient on the shroud with squealer tip

팁에서부터 약 2.5cm 이다. 두 경우 모두 비슷한 열전달 계수의 분포를 나타내는데, 팁 모서리 근처에는 낮은 열전달 계수 영역이 존재하고, 그 아래쪽으로 높은 열전달 계수 영역이 존재하는 것을 볼 수 있다. 팁 모서리 근처의 낮은 열전달 계수 영역은 leakage flow 가 팁 간극에서 흡입면 쪽으로 빠져 나올 때 팁 표면에서 박리하면서 형성된 재순환 영역의 영향이고, 높은 열전달 계수 영역은 leakage flow 와 주유동의 상호 작용에 의해 발생된 leakage vortex 의 영향이다. 팁 간극 크기의 증가에 따라 열전달 계수는 약간 증가하지만 그 영향은 그리 크지 않음을 볼 수 있다. 최대 열전달 계수의 값은 약 $700\sim 750\text{W/m}^2\text{K}$ 으로 shroud 에서의 최대 열전달 계수와 비슷하게 나타났다.

5. 결론

5.1 Squealer 팁 블레이드의 사용으로 블레이드 팁과 shroud 에서의 열전달 계수 값은 감소하였다. 하지만 압력면과 흡입면에서는 그

영향이 그리 크지 않았다.

- 5.2 일반적으로 팁의 열전달 계수가 가장 크고 압력면에서의 열전달 계수가 최소로 나타났다. Shroud 와 흡입면의 열전달 계수는 비슷한 값을 보였다.
- 5.3 팁 간극의 크기가 증가함에 따라 팁과 shroud 에서의 열전달 계수는 증가하는 경향을 보였지만 압력면과 흡입면에서는 그 영향이 그리 크지 않았다.
- 5.4 팁 근처의 흡입면에서는 leakage vortex 에 의한 높은 열전달 계수 영역이 나타났다.

참고문헌

- (1) Bunker, R. S., Baily, J.C., and Ameri, A.A., 2000, "Heat Transfer and Flow on the First Stage Blade Tip of a Power Generation Gas Turbine: Part I: Experimental Results", *Journal of Turbomachinery*, 122, pp. 272-277
- (2) Bunker, R. S. and Baily, J. C., 2001, "Effect of Squealer Cavity Depth and Oxidation on Turbine Blade Tip Heat Transfer", ASME Paper No. 2001-GT-0155
- (3) Azad, GM S., Han, J. C., Teng, S., and Boyle, R., 2000, "Heat Transfer and Pressure Distributions on a Gas Turbine Blade Tip", *Journal of Turbomachinery*, 122, pp.717-724
- (4) Azad, GM S., Han, J. C., and Boyle, R., 2000, "Heat Transfer and Pressure Distributions on the Squealer Tip of a Gas Turbine Blade", *Journal of Turbomachinery*, 122, pp. 725-732
- (5) Azad, GM S., Han, J. C., Bunker, R. S., and Lee, C. P., 2002, "Effect of Squealer Geometry Arrangement On a Gas Turbine Blade Tip Heat Transfer", *Journal of Heat Transfer*, 124, pp. 452-459
- (6) Rhee, D. H., Choi, J.H., and Cho, H.H., 2001, "Effect of Blade Tip Clearance on Turbine Shroud Heat/Mass Transfer", ASME Paper 2001-GT-0158
- (7) Jin, P. and Goldstein, R. J., 2002, "Local Mass/Heat Transfer on a Turbine Blade Tip", *The 9th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery*, Honolulu, February
- (8) Jin, P. and Goldstein, R. J., 2002, "Local Mass/Heat Transfer on Turbine Blade Near-Tip Surfaces", ASME Paper GT-2002-30556
- (9) Kline, S. J. and McClintock, F.A., 1953, "Describing Uncertainties in Single Sample Experiments", *Mechanical Engineering*, 75, pp. 3-8.