

< 논문 >

환형 캐스케이드 내 고정된 터빈 블레이드 및 슈라우드에서의 열/물질전달 특성 (II)

- 끝단 및 슈라우드 -

이 동 호* · 조 형 희 †

(2004 년 10 월 21 일 접수, 2005 년 3 월 8 일 심사완료)

Heat/Mass Transfer Characteristics on Stationary Turbine Blade and Shroud in a Low Speed Annular Cascade (II)

- Tip and Shroud -

Dong-Ho Rhee and Hyung Hee Cho

Key Words : Turbine Blade Tip(터빈 블레이드 끝단면), Shroud(슈라우드), Heat/Mass Transfer(열/물질전달), Tip Leakage Flow(팁 누설유동), Naphthalene Sublimation Method(나프탈렌 승화법)

Abstract

Experiments were conducted in a low speed stationary annular cascade to investigate local heat transfer characteristics on the tip and shroud and the effect of inlet Reynolds number on the tip and shroud heat transfer. Detailed mass transfer coefficients on the blade tip and the shroud were obtained using a naphthalene sublimation technique. The turbine test section has a single stage composed of sixteen guide vanes and blades. The chord length and the height of the tested blade are 150 mm and about 125 mm, respectively. The blade has flat tip geometry and the mean tip clearance is about 2.5% of the blade chord. The inlet flow Reynolds number based on chord length and incoming flow velocity is changed from 1.0×10^5 to 2.3×10^5 to investigate the effect of Reynolds number. Flow reattachment after the recirculation near the pressure side edge dominates the heat transfer on the tip surface. Shroud surface has very intricate heat/mass transfer distributions due to complex flow patterns such as acceleration, relaminarization, transition to turbulent flow and tip leakage vortex. Heat/mass transfer coefficient on the blade tip is about 1.7 times as high as that on the shroud or blade surface. Overall averaged heat/mass transfer coefficients on the tip and shroud are proportional to $Re_c^{0.65}$ and $Re_c^{0.71}$, respectively.

기호설명

C : 터빈 블레이드 코드길이
 C_x : 블레이드 축방향 코드길이
 D_{naph} : 나프탈렌 물질확산 계수
 h_m : 국소 물질전달계수
 l : 블레이드 높이

Nu_c : Nusselt 수
 Pr : Prandtl 수
 p : 블레이드 간격
 P_0 : 유입유동 총압
 P_s : 블레이드 혹은 슈라우드에서의 정압
 Re_c : 블레이드 코드 길이와 블레이드 입구 유동속도 기준 Reynolds 수
 Sc : Schmidt 수
 Sh_c : 블레이드 코드 길이 기준 Sherwood 수
 \overline{Sh}_c : 피치방향 평균 Sherwood 수

* 회원, 연세대학교 기계공학과

† 책임저자, 회원, 연세대학교 기계공학과

E-mail : hhcho@yonsei.ac.kr

TEL : (02)2123-2828 FAX : (02)312-2159

- \overline{Sh}_c : 전체 평균 Sherwood 수
 t : 블레이드 팁과 슈라우드 사이 간극
 V_0 : 상류 베인 입구에서의 유속
 W_1 : 블레이드 입구에서의 유동의 상대 유속
 W_2 : 블레이드 출구에서의 유동의 상대 유속
 x, y, z, s : 좌표계(Fig. 2)

그리스 문자

- β_1 : 블레이드 입구에서의 상대 유동각
 β_2 : 블레이드 출구에서의 상대 유동각

1. 서 론

터빈 블레이드는 슈라우드(shroud)와 유한한 간극(tip clearance)을 갖고 고속으로 회전하며 끝단의 간극을 통한 연소가스의 유입, 유출이 필연적으로 발생하기 때문에 가스터빈 엔진에서 열적으로 매우 취약한 요소 중 하나이다. 특히, 최근에는 터빈의 입구온도가 재질의 한계점을 상회하기 때문에 이러한 요소의 내구성 향상을 위해 막냉각 등 다양한 냉각방법 및 형상 변경 등이 이루어지고 있다. 하지만, 기존의 냉각방식 혹은 설계변경을 개선하려면, 이러한 요소, 즉, 터빈 블레이드 끝단 인접 표면, 끝단면 및 슈라우드에서의 유동 및 열전달 특성을 고찰하는 것이 필수적이다.

1편⁽¹⁾에 언급한 것과 같이 터빈 블레이드 미드스팬(mid-span), 즉 2차원적인 유동특성을 갖는 영역에서의 열전달 특성에 대한 연구는 과거부터 많이 이루어져 왔다. 하지만, 블레이드 끝단면 영역에서의 연구의 중요성이 커지면서 1990년대 후반에 들어 블레이드 끝단면에서의 기본적인 열전달 특성 및 냉각에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있으며, 최근에는 여러 조건에 대해서 끝단면에서의 형상변화 및 냉각에 따른 열전달 특성 및 냉각성능에 대한 연구가 이루어지고 있다.

Metzger 등⁽²⁾은 블레이드 끝단과 슈라우드에서의 열전달 특성에 대하여 연구하였으며, 블레이드 말단과 슈라우드에서의 열전달 해석을 위한 기초적인 수치해석 모델을 제시하였다. Bunker 등⁽³⁾과 Ameri와 Bunker⁽⁴⁾는 평면의 끝단 형상(flat tip)을 갖는 블레이드 끝단에서의 열전달 특성을 고찰하였으며, Azad 등^(5,6)은 단순형상 및 오목한 형상(recessed tip)의 블레이드 끝단에서의 유동 및 열전달 특성에 대해서 고찰하였다. 그 결과, 끝단 간극이 코드길이 기준 1%에서 2.5%로 증가함에 따라 전반적으로 열전달계수가 증가하는

것으로 나타났으며, 오목한 형상을 갖는 경우가 단순형상의 경우에 비해 낮은 열전달계수를 갖는 것으로 나타났다. Saxena 등,⁽⁷⁾ Saha 등⁽⁸⁾은 여러 가지 형상의 돌출물이 설치된 블레이드 끝단에 대해서 유동 및 열전달 특성을 실험 및 수치해석을 통해 고찰하였다. Jin과 Goldstein⁽⁹⁾은 나프탈렌 승화법을 이용하여 선형 터빈 익철에 대해서 끝단면 간극($t/C=0.86\sim6.90\%$) 및 작동조건 ($Re_c=4\sim7\times 10^5$)을 변화시켜가며 블레이드 끝단면에서의 국소 열/물질전달계수를 측정하였다. Papa 등⁽¹⁰⁾은 선형 터빈 캐스케이드를 이용하여 끝단면 주위에 여러 형상의 테두리(winglet)를 설치한 경우 유동가시화 및 나프탈렌 승화법을 이용하여 끝단면에서의 유동 및 열전달 특성을 고찰하고, 평면 끝단면의 경우와 비교하였다.

위의 연구들은 주로 블레이드 끝단면에서의 열전달 특성에만 초점이 맞춰져 있다. 하지만, 최근에는 이와 더불어 슈라우드에서의 열전달 특성에 관한 연구도 몇몇 연구자에 의해 진행되어 왔다.

Kwak과 Han⁽¹¹⁾은 감온성 액정(TLCs)을 이용하여 블레이드 끝단 인접부에서 누설유동이 블레이드 및 슈라우드에서의 열전달에 미치는 영향을 고찰하였다. Cho 등,⁽¹²⁾ Rhee 등⁽¹³⁾은 나프탈렌 승화법을 이용하여 선형 터빈 캐스케이드 내 블레이드 끝단 간극변화에 따른 슈라우드 면에서의 국소 열전달 특성을 고찰하였으며, 그 결과 매우 복잡하고 불균일한 열전달 특성을 갖는 것을 밝혀냈다.

지금까지의 연구들은 블레이드 표면, 끝단면 혹은 슈라우드 등과 같이 하나의 면에 대한 측정 및 해석에 초점을 맞춰 왔으며, 이러한 연구는 보다 정확한 열전달 특성 해석에 한계를 갖게 된다. 따라서, 본 연구에서는 1편과 동일한 실험 장치 및 조건에 대해서 블레이드 끝단면과 슈라우드 면에서의 국소 열전달 특성을 고찰하였으며, 1편에서 제시된 블레이드 표면에서의 국소 열전달 특성과 비교, 분석하여 보다 정확한 열전달 해석이 가능하도록 하였다. 또한, 다양한 운전조건에 대해서 열전달 특성을 동시에 고찰하고 해석하는 것이 필수적이므로, 블레이드 입구 유동의 Reynolds 수 변화에 따른 영향을 고찰하였다.

블레이드 끝단면 및 슈라우드에서의 국소 열/물질전달계수를 측정하기 위해 나프탈렌 승화법을 이용하여 실험을 수행하였다. 이 실험방법은 열전달 실험방법에서 발생하는 전도 및 복사오차를 제거할 수 있으며, 벽면 경계조건은 열전달 실험조건에 있어서 등온조건에 해당한다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

본 실험에는 환형 터빈 캐스케이드가 장착된 저속 풍동이 사용되었다. Fig. 1은 본 실험에 사용된 실험장치의 개략도를 나타내는 그림이다. 장치는 크게 상류측 팬(fan), 1단(one stage) 터빈 시험부, 하류측 흡입팬 등 세 부분으로 나누어진다. 상류팬을 통해 유입된 유동은 정체실(plenum chamber)을 지나 환형 유로로 유입되고, 이후 시험부, 즉 베인과 블레이드를 지난 후 하류측 팬을 통해 외부로 배출된다. 환형 유로는 외경 900 mm, 내경 640 mm로 유로의 높이는 130 mm이다. 베인과 블레이드는 각각 16개씩 설치되어 있으며, 베인은 환형 유로 입구로부터 540 mm 떨어진 곳에, 블레이드는 베인 하류 34 mm 떨어진 곳에 위치하도록 제작하였다. 블레이드는 회전 가능한 디스크에 고정되어 있으며, 본 실험에서는 디스크를 고정시켜 고정된 블레이드에 대하여 실험을 수행하였다. 실험장치에 대한 자세한 내용은 1편⁽¹⁾에 제시되어 있다.

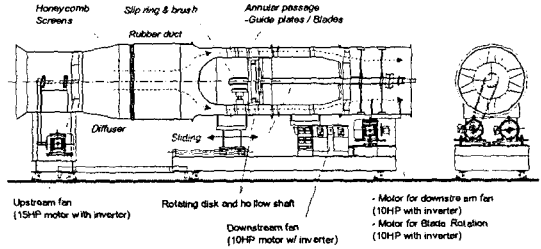


Fig. 1 Schematic view of experimental apparatus

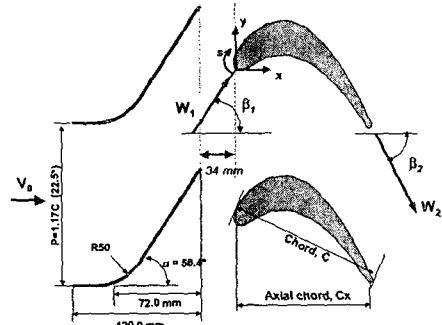


Fig. 2 Schematic view of guide vane and blade at tip

2.2 상류 베인 및 터빈 블레이드

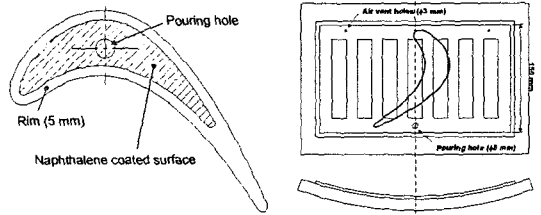
본 연구에서는 1단 터빈을 모델로 하여 시험부를 구성하였으며, Fig. 2에 미드스팬 기준 단면도가 제시되어 있다. 베인과 블레이드의 상대위치는 베인 출구에서의 유속의 분포가 균일하도록 위치를 설정하였으며, 베인과 베인의 정 중앙 영역에서 $y < 0$ 의 방향으로 약 3.2° 회전시킨 위치이다.

상류 베인은 두께 약 1.3 mm의 얇은 철판으로 제작하였으며, 입구각도는 0° , 출구각도는 56.4° 로 하였다. 터빈 블레이드는 GE 7FA 1단 블레이드의 미드스팬 형상을 기준으로 제작하였으며, 코드길이(chord length)는 150 mm이며, 끝단면에서의 블레이드 사이 간격은 1.17C이다. 블레이드 끝단 간극은 축방향을 따라 변화하며, 최소 약 2mm, 최대 약 6 mm의 값을 갖고, 평균 간극은 약 3.8mm ($t/C=2.5\%$)이다. 블레이드 형상에 대한 자세한 정보는 Table 1에 제시되어 있다.

2.3 시험 시편

Fig. 3은 시험시편의 개략도를 나타내는 그림이다. 블레이드 끝단면의 경우, 5mm의 테두리를 갖고 그 안쪽 영역에 나프탈렌이 코팅되도록 설계, 제작하였다.

슈라우드 시편의 경우, 곡률을 유지하도록 하기 위해 철판으로 제작하였다. 이 경우도 끝단면의 경우와 마찬가지로, 나프탈렌 코팅면 주위에 4mm 폭



(a) Tip (b) Shroud

Fig. 3 Naphthalene coated test plates

Table 1 Blade configurations

Number of blades	16	
Chord length (C)	150 mm	
Axial chord (C_x)	131.5 mm	
Pitch to chord ratio (p/C)	Hub	0.84
	Mean	1.01 (22.5°)
	Tip	1.17
Aspect ratio (l/C)	0.87	
Spacing between vane and blade	34 mm ($0.227C$)	
hub/tip radius ratio	0.711	
Blade inlet / exit angle	$\beta_1=56.4^\circ / \beta_2=-62.6^\circ$	
Turning angle	119.0°	
Mean tip clearance (t)	3.8 mm ($t/C=2.5\%$)	

의 테두리를 만들었으며 나프탈렌 코팅영역은 슈라우드는 축방향을 1.14 C_x , 원주방향을 2 피치를 포함하도록 하였다. 이때 블레이드의 상대위치를 점선으로 나타내었다.

2.4 실험 조건

본 연구에서는 $Re_c=1.5 \times 10^5$ 인 경우에 대해서 블레이드 끝단면과 슈라우드에서의 국소적인 열전달 특성을 고찰하였으며, 자세한 유동조건은 1편⁽¹⁾에 제시되어 있다. 또한, 블레이드 유입유동의 Reynolds 수 변화에 따른 영향을 살펴보았다. 이를 위해 Reynolds 수를 $Re_c=1.0 \times 10^5$, 1.5×10^5 , 2.3×10^5 로 변화시켜가며 실험을 수행하였다.

3. 열/물질전달계수

3.1 물질전달계수

본 연구에서는 국소 물질전달계수 측정을 위해 나프탈렌 승화법을 이용하였으며, 물질전달계수의 무차원수인 Sherwood 수는 다음과 같이 정의된다.

$$Sh_C = h_m C / D_{naph} \quad (1)$$

여기서 D_{naph} 는 Goldstein과 Cho⁽¹⁴⁾에 의해 제시된 값을 이용하였다. 본 연구에서의 불확실성 해석은 Kline과 McClintock⁽¹⁵⁾의 방법을 이용하여 이루어졌으며, 95%의 신뢰도에 대해서 약 $\pm 7.4\%$ 인 것으로 나타났다.

물질전달계수는 열과 물질전달 사이의 유사성을 이용하여 열전달계수로 전환될 수 있으며, 이에 대한 내용 및 결과비교는 1편에 제시되어 있다.

3.2 측정장치 및 방법

블레이드 표면, 팁, 슈라우드 표면에서의 국소 물질전달계수를 측정하기 위해서는 1편에서 제시된 바와 같이 나프탈렌 승화깊이를 측정해야 한다. 승화깊이는 실험 전과 후의 나프탈렌 표면고도를 측정함으로써 얻을 수 있다. 본 연구에서는 블레이드 표면 등 곡면을 측정하기 위해 4축 이송 및 회전장치와 선형가변차동변환기(LVDT; linear variable differential transformer)를 이용하여 블레이드 표면, 끝단면 및 슈라우드 표면에서의 나프탈렌 승화량을 측정하였다. LVDT 및 4축 측정장비의 자세한 사양은 Rhee⁽¹⁶⁾에 제시되어 있다.

4. 실험 결과 및 토의

4.1 슈라우드에서의 정압계수 분포

본 실험에서의 블레이드 입구 유동조건 및 블레이드 표면에서의 정압 분포는 1편⁽¹⁾에 상세히 기술되어 있으며, 슈라우드 표면에서의 정압 분포는 Fig. 4에 제시되어 있다. 정압계수는 다음과 같이 정의된다. 여기서, 동압은 베인 입구에서의 속도를

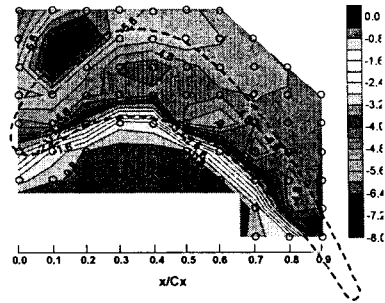


Fig. 4 Distribution of static pressure coefficient on the shroud surface

기준으로 하였다.

$$C_p = (P_s - P_0) / 0.5 \rho V_0^2 \quad (2)$$

Fig. 4에서 점선으로 표시된 것은 블레이드의 위치를 나타내며, 실선으로 표시된 작은 원들은 정압 측정을 위한 압력 탭의 위치를 나타낸다.

1편⁽¹⁾에서 제시된 미드스팬에서의 결과와 마찬가지로 압력면 측에서는 균일하고 높은 정압계수 분포를 보이지만, 흡입면을 따라가면서 유동의 가속으로 인해 $x/C_x \approx 0.15$ 부근에서 극소값을 갖고 이후 서서히 정압이 회복되는 것을 알 수 있다. 이처럼 압력면 측과 흡입면 측간의 압력차이로 인해 끝단 간극을 통해 흐르는 누설유동이 발생하게 된다.

압력면에서 끝단 간극 내로 유동이 유입되면서 급격히 압력이 감소하게 되고, 끝단 간극 내에서는 전체적으로 고른 정압계수 분포를 갖는다. 하지만, $x/C_x \approx 0.35$ 부근에서 다른 영역에 비해 약간 높은 정압계수를 갖는 것으로 나타났으며, 이는 열전달 실험결과(Fig. 8)에서 설명할 누설유동의 특성과 연관되어 있다.

4.2 국소 열/물질전달 특성

4.2.1 끝단면에서의 열전달 특성

Fig. 5는 블레이드 끝단 면에서의 국소 열/물질전달계수 분포를 나타내는 그림이다. 블레이드 끝단의 경우, 알루미늄 테두리(rim) 부분은 측정이 불가능하기 때문에 하얀 영역으로 표시하였다.

블레이드 끝단 면에서는 압력면을 따라 팁 간극 내로 유동이 유입되면서 압력면 모서리에서 유동 박리(separation)가 발생하게 된다. 이후 박리된 유동이 재부착하면서 높은 열/물질전달계수를 갖게 된다. 이때 블레이드 끝단에서의 최대 열/물질전달계수는 블레이드 표면 혹은 슈라우드에서의 최대값에 비해 약 1.5배 이상 높은 것으로 나타났으며,

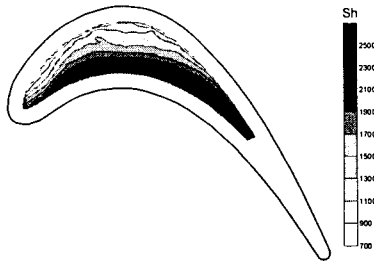


Fig. 5 Contour plot of Sh_c on the tip surface at $Re_c=1.5 \times 10^5$

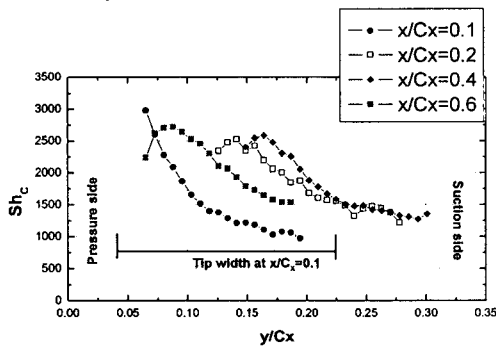


Fig. 6 Local distributions of Sh_c on the tip surface at $Re_c=1.5 \times 10^5$

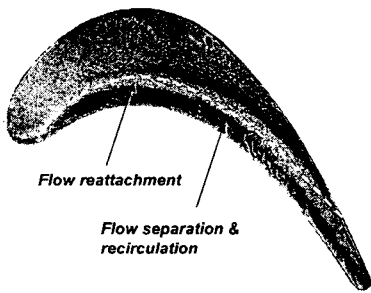


Fig. 7 Oil-lampblack flow visualization on blade tip

이를 통해 블레이드 끝단면은 상당히 큰 열부하를 받는다는 것을 알 수 있다. 유동이 재부착한 이후 발달하면서 흡입면 쪽으로 진행하면서 열/물질전달계수가 서서히 감소하는 분포를 갖게 된다.

이러한 특성은 국소 물질전달계수 분포를 나타낸 Fig. 6과 끝단면에서의 유막가시화 결과(Fig. 7)에서 명확하게 나타난다.

국소 분포를 보면 $x/C_x=0.1$ 인 경우를 제외하면, 유입 유동의 박리 및 재순환으로 인해서 압력면 인접부에서 낮은 물질전달계수를 갖는 것을 확인할 수 있으며, 이후 재부착으로 인해 최대값을 갖는 것을 알 수 있다. 이때 최대값의 크기는 전체적으로 거의 동일한 것으로 나타났으며, 이로부터 블레이드 전체면에서 누설유동이 비교적 균일하게 형성되는 것을 알 수 있다.

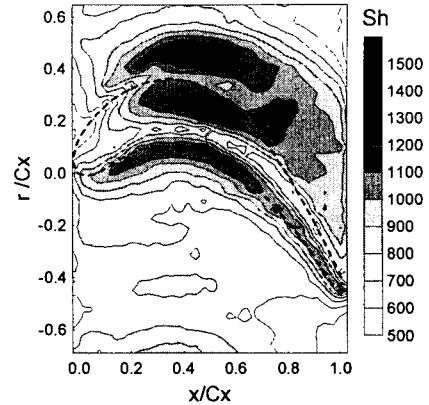


Fig. 8 Contour plot of Sh_c on the shroud surface at $Re_c=1.5 \times 10^5$

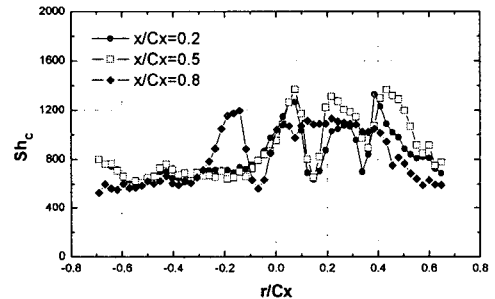


Fig. 9 Local distributions of Sh_c on the shroud surface at $Re_c=1.5 \times 10^5$

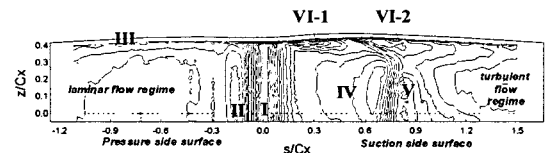


Fig. 10 Classification of flow regimes on the surface and local heat/mass transfer characteristics on the blade surface

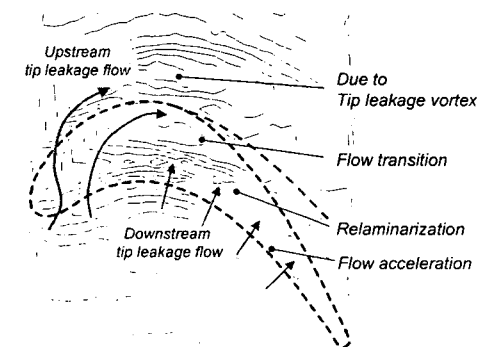


Fig. 11 Schematic of expected flow pattern on the shroud surface

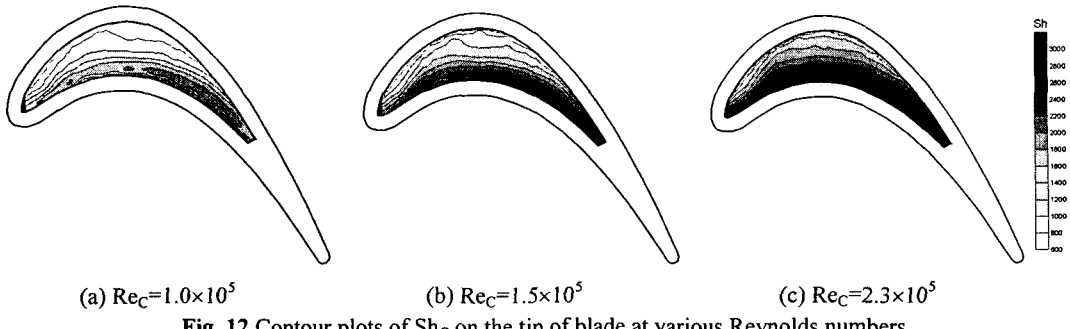


Fig. 12 Contour plots of Sh_c on the tip of blade at various Reynolds numbers

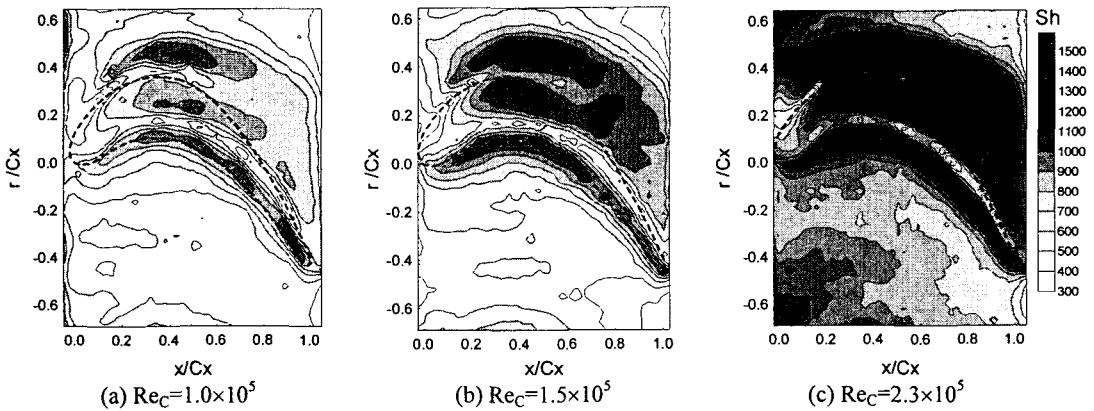


Fig. 13 Contour plots of Sh_c on the shroud at various Reynolds numbers

유막가지화 결과에서도 유동 박리, 재부착 등에 의한 특성이 잘 나타나있다. 재부착 영역은 하안 점선으로 표시하였으며, 이 영역은 Fig. 5에 제시한 열/물질전달 실험결과와 잘 일치한다. 또한, 명확하게 나타나지는 않지만, 블레이드 전연 부근에서 흡입면 쪽으로 빠져나가는 유동궤적이 관찰되며, 이로부터 1편에서 언급한 것과 같이 상류측 누설유동이 형성되는 것을 간접적으로 확인할 수 있다.

4.2.2 슈라우드 면에서의 열전달 특성

Fig. 8과 Fig. 9는 슈라우드 표면에서의 극소 열전달 분포를 나타내는 그림이다. Fig. 8에서 점선은 블레이드의 위치를 나타낸다.

슈라우드에서의 극소 열전달 특성은 간극 내로의 유입유동 및 누설유동에 의해 결정된다. 1편에서 언급한 바와 같이, 압력면 근방의 유동은 블레이드 압력면과 흡입면 사이의 압력차로 인해 간극 내로 유입되면서 유동의 가속이 이루어진다. 따라서 슈라우드 면에서는 블레이드 압력면 형상을 따라가면서 열/물질전달계수가 높게 나타난다. 이후 극소값을 갖는 영역이 관찰되는데, 이러한 영역은 끝단면에서의 재부착지점과 거의 일치한다.

앞서 언급한 바와 같이, 끝단면 측에서 유동 박리와 함께 재순환영역이 형성되기 때문에 간극의 유효 유로면적이 감소하게 되고, 결과적으로 슈라우드 쪽 유동의 가속이 촉진된다. 따라서, 간극 내로 유입된 난류유동이 가속되면서 재층류화되는 현상이 발생하고, 이로 인해 슈라우드 면 간극 내에서 극소값을 갖는 것으로 생각된다. 이러한 현상은 Tilt와 Moore,⁽¹⁷⁾ Cho 등,⁽¹¹⁾ Rhee 등⁽¹²⁾의 연구 결과에서도 관찰할 수 있다. 하지만 Kwak과 Han⁽¹⁰⁾의 결과를 참고해보면, 유입유동의 Reynolds 수 혹은 난류강도가 높은 경우, 재층류화 현상은 약화되거나 발생하지 않을 수도 있을 것으로 예상된다. 극소값 이후에 난류로의 천이에 의한 또 하나의 극대값이 간극 내에 발생하게 된다.

간극의 바깥쪽 영역은 누설유동에 의해 형성되는 누설와류에 의해 크게 영향을 받게 된다.

간극 바깥쪽 영역에 흡입면을 따라가면서 높은 열전달계수를 갖는 영역이 형성되는데, 이것은 1편⁽¹⁾에서 언급했던 누설유동 중에서 상류에서 빠져 나오는 누설유동에 의한 것으로 생각된다. 즉, 상류측($x/C_x < 0.2$)에서 빠져 나온 누설유동은 블레이드의 표면에 약하게 영향을 준 뒤 (VI-1, Fig. 10) 하류로 진행하면서 블레이드 표면에서 떨어져 나

오게 되고, 그 후 주유동과의 상호작용으로 인해 큰 누설와류가 형성되어 슈라우드 면에 영향을 주기 때문인 것으로 생각된다. 이러한 현상은 본 실험에서 사용된 블레이드의 회전각이 크기 때문에 좀 더 명확하게 나타난 것으로 생각되며, 실제 끝단의 형상처럼 회전각이 더 작은 경우는 이러한 경향이 약화될 것으로 생각된다. 반면에, 하류 측에서 발생하는 누설유동은 블레이드 표면에 가깝게 형성되고 블레이드를 따라 흐르기 때문에 Fig. 10에 제시된 것과 같이 블레이드 표면에는 큰 영향을 주지만, 슈라우드 면에서는 영향을 주지 않는 것으로 생각된다. 이와 같이 예상되는 유동특성을 Fig. 11에 개략적으로 제시하였다.

전체적으로 슈라우드에서의 열전달계수는 끝단면에서의 열전달계수에 비해 최대 약 70%, 평균적으로 약 50% 정도의 열전달계수를 갖고, 블레이드 표면에서의 열전달계수와 비슷한 크기를 갖는 것으로 나타났다.

Fig. 9를 보면, $x/C_x=0.2, 0.5$ 인 곳에서 압력면을 통한 유동의 유입, 난류로의 천이, 누설와류에 의해 총 3개의 극대값이 형성되는 것을 관찰할 수 있고, 이후 하류($x/C_x=0.8$)에서는 압력면 측에서 하나의 극대값을 갖고, 흡입면 근방에서는 난류로의 천이에 의한 효과와 누설와류에 의한 효과가 명확하게 구분되지 않는 것을 알 수 있다.

4.3 Reynolds 수 변화에 따른 열전달 특성

4.3.1 국소 열전달 계수 분포

Fig. 12는 다양한 블레이드 입구 Reynolds 수에 따른 블레이드 끝단면에서의 열/물질전달계수 분포를 나타내는 그림이다. 본 실험범위에서는 Reynolds 수가 증가할수록 경향은 동일하지만, 전체적으로 끝단면에서의 열/물질전달은 증가하는 것으로 나타났다.

Fig. 13은 Reynolds 수 변화에 따른 슈라우드 표면에서의 국소 열/물질전달계수 분포를 나타내는 그림이다. 끝단면에서의 경우와 마찬가지로 슈라우드에서의 열/물질전달 특성도 본 실험 범위 내에서 Reynolds 수 변화에 관계없이 일정하게 유지되는 것으로 나타났다. 즉, 유동의 가속과 재층류화, 난류로의 천이 등의 유동현상은 실험 범위 내에서 모두 관찰되었다. 하지만, 주유동의 Reynolds 수가 매우 크거나 난류강도가 매우 높은 경우, 재층류화 및 난류로의 천이현상은 약화되거나 소멸될 가능성이 있으며, 이에 대한 연구는 좀 더 진행되어야 한다.

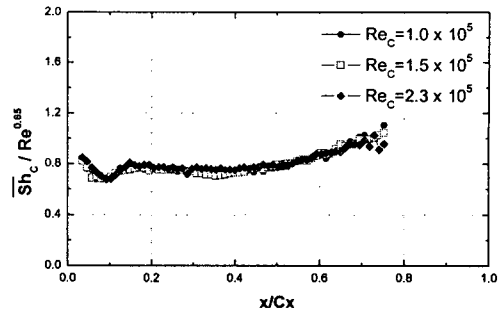


Fig. 14 Pitchwise averaged Sh_C on the flat tip of blade at various Reynolds numbers

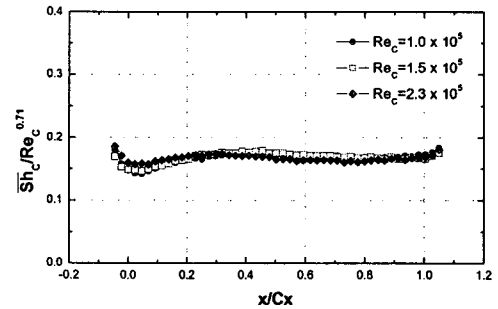


Fig. 15 Pitchwise averaged Sh_C on the shroud at various Reynolds numbers

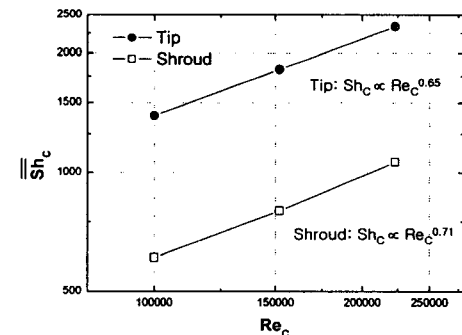


Fig. 16 Total average Sh_C on the flat tip of blade and shroud

4.3.2 평균 열/물질전달계수 분포

Fig. 14와 Fig. 15는 블레이드 끝단면 및 슈라우드에서의 피치방향으로 평균한 물질전달계수 분포를 나타내는 그림이다. 이때, 끝단면과 슈라우드에서의 피치방향 평균 열/물질전달계수는 각각 $Re_C^{0.65}$ 과 $Re_C^{0.71}$ 로 무차원화 하였으며, 그 결과 서로 다른 조건에서의 값들이 매우 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

블레이드 끝단 간극 내에서의 유동은 Moore와 Tilton⁽¹⁷⁾이 제시한 것과 같이 채널 내에서의 난류 유동으로 단순화하여 생각할 수 있으며, 그 경우 열전달은 $Re^{0.8}$ 에 비례하는 것으로 생각할 수 있다.

그러나, 본 연구에서의 결과를 보면 유동의 박리 및 재부착 등으로 인해 그러한 경우에 비해 Reynolds 수의 영향이 적은 것을 알 수 있다.

슈라우드의 경우도 마찬가지로, 보통 난류 유동장이 존재하는 표면에서의 열전달은 $Re^{0.8}$ 에 비례하지만, 유동의 가속, 재층류화, 난류로의 천이 등 매우 복잡한 유동특성을 동시에 갖기 때문에 일반적인 경우에 비해 Reynolds 수의 영향이 약간 적은 것으로 생각된다. 이러한 경향은 Fig. 16에 제시된 바와 같이 전체 평균 열/물질전달계수 분포를 통해 확인할 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 블레이드 끝단면 및 슈라우드에서의 국소적인 열/물질전달 특성에 대해서 고찰하고, 블레이드 입구 유동의 Reynolds 수 변화에 따른 영향을 살펴보았으며, 그 결과는 다음과 같이 요약될 수 있다.

(1) 블레이드 끝단면에서는 압력면 측에서 유입되는 유동이 압력면 측 모서리에서 박리가 일어난 뒤 재부착하면서 높은 열전달계수를 갖는다. 이후 간극 내에서 경계층이 발달하면서 서서히 열전달계수가 감소하는 형태를 갖는다. 전체적으로 열/물질전달계수 분포는 단순하지만, 블레이드 표면 혹은 슈라우드 면에 비해 평균적으로 약 1.5배 이상 열전달이 높은 것으로 나타났다.

(2) 슈라우드에서는 유동의 가속, 재층류화, 난류로의 천이 및 누설와류에 의해 매우 복잡하고, 피치방향으로 불균일한 열/물질전달 특성을 갖는 것으로 나타났다. 특히, 블레이드 표면에는 별 영향을 주지 않는 것으로 나타난 상류측 누설유동이 주유동과의 상호작용으로 인해 간극 외부 슈라우드 면에서 큰 영향을 주는 것으로 나타난 반면, 하류측 누설유동의 영향은 거의 관찰되지 않았다.

(3) 블레이드 끝단면에서의 열전달 특성도 블레이드 표면에서의 경우와 마찬가지로 Reynolds 수 변화에 따라 전체적인 크기는 변화하지만 특성은 동일하게 유지되는 것으로 나타났다. 또한 평균적으로 $Re_c^{0.65}$ 에 비례하는 것으로 나타나 난류 유동에서의 열전달에 비해 Reynolds 수의 영향이 적은 것으로 나타났으며, 이것은 압력면 인접부에서의 유동의 박리 및 재부착 현상에 기인하는 것으로 생각된다.

(4) 슈라우드 면에서는 Reynolds 수가 증가함에 따라 열/물질전달계수가 $Re_c^{0.71}$ 에 비례하여 증가하는 것으로 나타났다. 이는 끝단면에서의 경우와 유사하게 유동의 가속, 재층류화 및 난류로의 천

이 등 복잡한 유동에 의한 영향에 기인한다.

후 기

본 연구는 과학기술부 주관 국가지정연구실(NRL) 사업의 지원에 의한 결과이며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Rhee, D. H. and Cho, H. H., 2005, "Heat/Mass Transfer Characteristics on Stationary Turbine Blade and Shroud in a Low Speed Annular Cascade (I) – Near-tip Surface," *Trans. of the KSME B*, Vol. 29, No. 4, pp. 485~494.
- (2) Metzger, D. E., Dunn, M. G. and Hah, C., 1991, "Turbine Tip and Shroud Heat Transfer," *ASME J. of Turbomachinery*, Vol. 113, pp. 502~507.
- (3) Bunker, R. S., Bailey, J. C. and Ameri, A. A., 2000, "Heat Transfer and Flow on the First Stage Blade Tip of a Power Generation Gas Turbine Part 1: Experimental Results," *ASME J. of Turbomachinery*, Vol. 122, pp. 263~271.
- (4) Ameri, A. A. and Bunker, R. S., 2000, "Heat Transfer and Flow on the First Stage Blade Tip of a Power Generation Gas Turbine Part 2: Simulation Results," *ASME J. of Turbomachinery*, Vol. 122, pp. 272~277.
- (5) Azad, Gm S., Han, Je-Chin, Teng, S. and Boyle, R. J., 2000, "Heat Transfer and Pressure Distributions on a Gas Turbine Blade Tip," *ASME J. of Turbomachinery*, Vol. 122, pp. 717~724.
- (6) Azad, Gm S., Han, Je-Chin and Boyle, R. J. 2000, "Heat Transfer and Flow on the Squealer Tip of a Gas Turbine Blade," *ASME J. of Turbomachinery*, Vol. 122, pp. 725~732.
- (7) Saxena, V., Nasir, H. and Ekkad, S. V., 2003, "Effect of Blade Tip Geometry on Tip Flow and Heat Transfer for a Blade in a Low Speed Cascade," *ASME J. of Turbomachinery*, Vol. 126, pp. 130~138.
- (8) Saha, A. K., Acharya, S., Prakash, C. and Bunker, R., 2003, "Blade Tip Leakage Flow and Heat Transfer With Pressure-Side Winglet," *ASME Paper*, No. GT-2003-38620.
- (9) Jin, P. and Goldstein, R. J., 2002, "Local Mass/Heat Transfer on a Turbine Blade Tip," *9th of International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery*, Paper No. HT-ABS-012.
- (10) Papa, M., Goldstein, R. J. and Gori, F., 2003, "Effects of Tip Geometry and Tip Clearance on the Mass/Heat Transfer From a Large-Scale Gas Turbine Blade," *ASME J. of Turbomachinery*, Vol. 125, pp. 90~96.
- (11) Kwak, J. S. and Han, J. C., 2003, "Heat Transfer Coefficients on the Squealer Tip and Near Squealer Tip Regions of a Gas Turbine Blade," *ASME J. of Heat Transfer*, Vol. 125, pp. 669~677.
- (12) Cho, H. H., Rhee, D. H. and Choi, J. H., 2001,

- "Heat/Mass Transfer Characteristics on Turbine Shroud with Blade Tip Clearance," *Annals of The New York Academy of Sciences, Heat Transfer in Gas Turbine Systems*, Vol. 934, pp. 281~288.
- (13) Rhee, D. H., Choi, J. H. and Cho, H. H., 2001, "Effect of Blade Tip Clearance on Turbine Shroud Heat/Mass Transfer," *ASME Paper*, No. 2001-GT-158.
- (14) Goldstein, R. J. and Cho, H. H., 1995, "A Review of Mass Transfer Measurement Using Naphthalene Sublimation," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 10, pp. 416~434.
- (15) Kline, S. J. and McClintock, F., 1953, "Describing Uncertainty in Single Sample Experiments," *Mechanical Engineering*, Vol. 75, pp. 3~8.
- (16) Rhee, D. H., 2004, "Local Heat/Mass Transfer Characteristics on Turbine Rotor and Shroud in a Low Speed Annular Cascade," Ph. D. Thesis, Yonsei University.
- (17) Moore, J. and Tilton, J. S., 1988, "Tip Leakage Flow in a Linear Turbine Cascade," *ASME J. of Turbomachinery*, Vol. 110, pp. 18~26.