

터빈 블레이드 말단과 슈라우드 사이의 간극변화에 따른 슈라우드에서의 열/물질전달 특성

이동호*·최종현*·조형희†

(2000년 9월 6일 접수, 2000년 12월 21일 심사완료)

Heat/Mass Transfer Characteristics on Shroud with Turbine Blade Tip Clearances

Dong-Ho Rhee, Jong-Hyun Choi and Hyung-Hee Cho

Key Words: Turbine Cascade(터빈 익렬), Tip Clearance(말단 간극), Shroud(슈라우드), Heat/mass Transfer(열/물질전달), Naphthalene Sublimation Method(나프탈렌승화법)

Abstract

The present study is conducted to investigate the local heat/mass transfer characteristics on the shroud with blade tip clearances. The relative motion between blade and shroud has little influence on the overall heat transfer characteristics, except some local effects. Therefore, the relative motion between the blade and shroud is neglected in this study. A naphthalene sublimation method is employed to determine the detailed local heat/mass transfer coefficients on the surface of the shroud. The tip clearance is changed from 0.66% to 2.85% of the blade chord length. The flow enters the gap between the blade tip and shroud at the pressure side due to the pressure difference. Therefore, the heat/mass transfer characteristics on the shroud are changed significantly from those with endwall. At first, high heat/mass transfer occurs along the profile of blade at the pressure side due to the entrance effect and acceleration of the gap flow. Then, the heat/mass transfer coefficients on the shroud increase along the suction side of the blade because tip leakage vortices are generated and interact with the main flow. The results show that the heat/mass transfer characteristics are changed largely with the gap distance between the tip of turbine blade and the shroud.

기호설명

C = 터빈 블레이드 코드(chord) 길이
 C_{Ps} = 정압계수, 식 (4)
 C_x = 터빈 블레이드 축방향 코드 길이
 dy = 나프탈렌 승화깊이
 D_{naph} = 공기 중에서의 나프탈렌의 물질확산계수
 h_m = 국소 물질전달계수, 식 (1)

\dot{m} = 단위면적 당 나프탈렌 질량유속
 Nu = Nusselt 수, hC/k
 Pr = Prandtl 수, $\mu C_p/k$
 P = 블레이드 사이 간격
 P_{0l} = 주유동의 전압
 P_s = 블레이드 표면에서의 정압
 Re_C = Reynolds 수, $\rho U_{exit}C/\mu$
 Sc = Schmidt 수
 Sh = Sherwood 수, 식 (2)
 t = 블레이드 말단과 슈라우드 사이 말단간극
 $T.I.$ = 주유동의 난류강도
 U_{in} = 블레이드 입구에서의 유속

* 연세대학교 대학원

† 책임저자, 회원, 연세대학교 기계공학과

E-mail : hhcho@yonsei.ac.kr

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

U_{exit} = 블레이드 출구에서의 유속
 x = 블레이드 전연으로부터의 종방향 좌표, Fig. 1
 z = 블레이드 전연으로부터의 횡방향 좌표, Fig. 1

그리스문자

ρ_l = 주유동의 밀도
 ρ_s = 고체나프탈렌의 밀도
 $\rho_{v,w}$ = 나프탈렌표면에서의 나프탈렌 증기밀도
 $\rho_{v,\infty}$ = 분사제트의 나프탈렌 증기밀도
 $d\tau$ = 나프탈렌 표면의 유동장 노출시간

1. 서론

가스터빈엔진의 경우, 회전하는 요소(압축기 혹은 터빈 블레이드)와 슈라우드(shroud) 사이에 유한한 간극(tip clearance)이 존재하게 된다. 이때 블레이드의 압력면(pressure side)과 흡입면(suction side) 사이의 압력차로 인하여 말단간극을 통한 누설유동(leakage flow)이 발생하게 된다. 이러한 누설유동은 요소의 성능 및 구조적 내구성에 큰 영향을 미치게 된다.⁽¹⁾

터빈 블레이드의 경우, 고온의 연소가스가 간극 내로 유입되기 때문에 블레이드 말단(blade tip)이나 슈라우드에 과도한 열부하가 걸리게 된다. 따라서, 터빈요소의 내구성을 향상시키기 위하여 막냉각 등과 같은 다양한 냉각방법을 블레이드 말단 및 슈라우드에 적용하고 있으며, 보다 효과적인 냉각을 위해서는 블레이드 말단 및 슈라우드에서의 정확한 열전달 특성을 파악하는 것이 중요하다. 하지만, 블레이드 말단 및 슈라우드에서의 열전달 특성에 대한 연구는 연구방법상의 어려움으로 인하여 최근에 들어서야 활발히 진행되고 있다. Metzger 등⁽¹⁾은 블레이드 말단과 슈라우드에서의 열전달 특성에 대하여 연구하였으며, 그 결과 블레이드 말단과 슈라우드에서의 열전달 해석을 위한 기초적인 수치해석 모델을 제시하였다. Bunker 등⁽²⁾과 Ameri와 Bunker⁽³⁾는 단순형상(flat tip)을 갖는 블레이드 말단에서의 열전달 특성을 고찰하였다. 그 결과 블레이드 전연(leading edge)영역에서 낮은 열전달계수를 갖는 영역이 형성되며, 압력면에서의 박리유동과 간극을 통한 누설유동이 블레이드 말단에서의 열전달 특성에 매우 큰 영향을 주는 것으로 나타났다. 또한 블레이드 말단 모서리에 곡률이 있는 경우

(round tip), 누설유량의 증가로 인하여 단순형상의 경우에 비해 열전달계수가 증가하는 것으로 나타났다. Azad 등^(4,5)은 단순형상 및 오목한 형상(recessed tip)의 블레이드 말단에서의 유동 및 열전달특성을 고찰하였다. 그 결과, 말단간극이 증가함에 따라 전반적으로 열전달계수가 증가하는 것으로 나타났으며, 오목한 형상을 갖는 경우가 단순형상의 경우에 비해 낮은 열전달계수를 갖는 것으로 나타났다. Dunn과 Haldeman⁽⁶⁾은 열유속계를 이용하여 회전하는 터빈에 대하여 정익과 동익 사이의 간격 변화시의 블레이드 말단에서의 열유속을 측정하였다.

본 연구에서는 확대된 선형 터빈 캐스케이드(large scale linear turbine cascade)를 이용하여, 블레이드 말단과 슈라우드 사이의 말단간극 변화시 슈라우드에서의 국소 열/물질전달특성을 고찰하였다. 블레이드와 슈라우드 사이의 상대운동은 전반적인 열전달특성에 거의 영향을 주지 않기 때문에,^(1,2) 본 연구에서는 블레이드와 슈라우드 사이의 상대운동효과를 고려하지 않았다.

슈라우드에서의 국소 열/물질전달계수를 측정하기 위하여 물질전달실험방법 중의 하나인 나프탈렌 승화법을 이용하여 실험을 수행하였다. 이 실험방법은 열전달실험방법에서 발생하는 전도 및 복사오차를 제거할 수 있으며, 벽면 경계조건은 열전달실험조건에 있어서 동온조건에 해당한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 연구에 사용된 장치는 크게 풍동(wind tunnel), 시험부(test section)로 나눌 수 있다. 풍동은 개방송출형(open blowing type)으로 송풍기(blower), 확산부(diffuser), 수축부(contraction)로 나뉜다. 송풍기는 인버터(inverter)를 이용하여 주유동의 속도조절이 가능하다. 본 연구에서는 블레이드 입구유속이 8 m/s인 경우에 대하여 실험을 수행하였으며, 이때 블레이드 출구유속은 약 20 m/s이다. 또한 시험부의 시작지점에 직경 3.0 mm의 트립와이어(trip wire)를 설치하여 완전발달된 난류 경계층 유동을 얻을 수 있었다. 난류발생격자를 설치하지 않은 경우, 주유동의 난류강도는 $T.I.=0.7\%$ 이다.

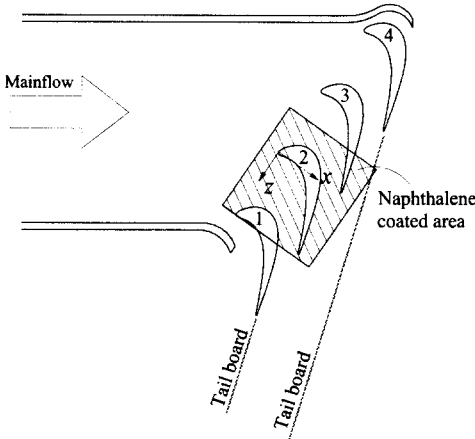


Fig. 1 Schematic view of test section

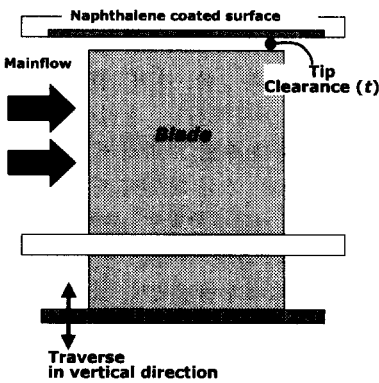


Fig. 2 Schematic view of shroud and blade tip region

Fig. 1은 시험부를 개략적으로 나타낸 그림이다. 시험부의 길이는 750 mm이며, 단면의 크기는 300 mm×195 mm이다. 블레이드는 총 4개가 설치되며, 4개의 블레이드에 균일한 유동이 유입 되도록 하기 위하여 맨 끝쪽의 블레이드 옆면에 부착된 bypass guide vane과 tail board를 적절히 조절하였다.

터빈 캐스케이드 슈라우드에서의 열/물질전달 특성을 고찰하기 위하여 Fig. 2에서와 같이 블레이드 위쪽 부분에 나프탈렌 시편을 설치하였다.

블레이드 말단과 슈라우드 사이의 말단간극 변화효과를 고찰하기 위하여, 말단간극을 0 mm에서 4.56 mm까지 변화시켜 가며 실험을 수행하였으며, 원하는 말단간극을 얻기 위하여, Fig. 2에서와 같이 블레이드 고정판을 상하로 이송시켜가며

Table 1 Configuration of the turbine cascade and operating conditions

Number of blades	4
Chord length of blade (C)	160 mm
Axial chord length (C _x)	112 mm
Pitch to chord ratio (p/C)	0.7
Blade inlet angle	35°
Blade exit angle	-72.5°
Incoming velocity (U _{in})	8 m/s
Turbulence intensity of incoming flow (T.I.)	~0.7% (~6% with grid)
Exit flow velocity (U _{exit})	20 m/s
Reynolds number based on U _{exit} and C (Re _C)	2.1 × 10 ⁵
Tip clearance (t)	0 ~ 4.56 mm (t/C=0 ~ 2.85%)

말단간극을 변화시켰다.

또한, 주유동의 난류강도 효과를 보기 위하여, 터빈 블레이드 전연 상류 200 mm에 난류발생격자를 설치하여 실험을 수행하였다. 격자를 설치한 경우, 주유동의 난류강도는 T.I.=6%이다. 블레이드의 자세한 사양 및 실험조건은 Table 1에 정리되어 있다.

2.2 승화깊이 측정장치

열/물질전달계수를 계산하기 위해서 시험시편의 나프탈렌층의 표면형상을 실험전후에 측정하여 실험 중 승화된 나프탈렌의 깊이를 측정한다. 이를 위한 측정장치는 LVDT(Linear Variable Differential Transformer; LBB-375TA-020) 및 2차원 자동이송장치로 구성된다. 측정장치의 자세한 사양은 이동호 등⁽⁷⁾과 동일하다.

2.3 열/물질전달계수

국소 물질전달계수는 다음과 같이 정의된다.

$$h_m = \frac{\dot{m}}{\rho_{v,w} - \rho_{v,\infty}} = \frac{\rho_s(dy/dt)}{\rho_{v,w}} \quad (1)$$

본 연구에서는 유입되는 주유동에 나프탈렌이 포함되어있지 않으므로 $\rho_{v,\infty}=0$ 이다. 따라서 물질전달계수는 나프탈렌 승화량(dy), 실험시간(dτ),

고체 나프탈렌 밀도(ρ_s), 표면에서의 나프탈렌 증기밀도($\rho_{v,w}$)를 통해서 구할 수 있다. 표면에서의 나프탈렌 증기밀도는 Ambrose 등⁽⁸⁾이 제안한 실험식으로부터 얻은 나프탈렌의 포화증기압을 이상기체 방정식에 대입하여 구한다.

물질전달계수의 무차원 형태인 Sherwood 수는 다음과 같이 표현된다.

$$Sh = \frac{h_m C}{D_{naph}} \quad (2)$$

여기서, D_{naph} 는 Goldstein과 Cho⁽⁹⁾가 제시한 나프탈렌의 물성치에 근거하였다.

앞에서 계산된 물질전달계수는 열전달과 물질전달간의 유사성을 이용하여 열전달계수로 전환할 수 있으며,⁽¹⁰⁾ 그 식은 다음과 같다.

$$\frac{Nu}{Sh} = \left(\frac{Pr}{Sc} \right)^{0.4} \quad (3)$$

실험결과에 대한 오차해석은 Kline과 McClintock⁽¹¹⁾이 제시한 방법을 이용하여 95%의 신뢰도로 불확실성 해석을 하였으며, 전체적으로 7.1% 이내의 불확실성을 갖는 것으로 나타났다.

이와 같은 불확실성은 대부분 나프탈렌의 물성치의 불확실성에 기인하는 것으로, 나프탈렌 포화증기압의 경우는 3.8%, 나프탈렌 물질확산계수의 경우 5.1%의 불확실성을 갖는다. 하지만 나프탈렌 승화값이의 불확실성은 0.7%으로 매우 작으며, 표면온도, 고체 나프탈렌의 밀도, 물질전달계수의 불확실성은 각각 0.2%, 1.1%, 4.9%로 나타났다.

3. 실험결과 및 토의

3.1 압력분포

Fig. 3은 2번째와 3번째 블레이드에서 블레이드 중간높이(mid-span)에서의 정압계수(static pressure coefficient) 분포를 나타내는 그림이다.

정압계수는 다음과 같이 정의된다.

$$C_{P_s} = (P_{01} - P_s) / (0.5 \rho_1 U_{in}^2) \quad (4)$$

여기서, P_{01} 은 입구전압을 나타낸다. 정압계수가

큰 경우는 정압이 낮은 것을 의미한다. 그림에서 보면 알 수 있듯이, 인접 블레이드 주위에서의 유동특성이 거의 동일한 것을 알 수 있다.

Fig. 4는 말단간극을 변화시킬 때 블레이드 높이의 95%지점에서의 정압계수 분포를 나타내는 그림이다. 그림에서와 같이 압력면에서의 정압이 흡입면에서의 정압보다 크며, 이러한 압력차로 인하여 간극을 통한 누설유동이 발생하게 된다.

압력면에서의 정압계수는 말단간극변화와 상관없이 거의 일정한 값을 나타낸다. 하지만, 압력면 쪽에서의 유입유동으로 인하여 말단간극이 증가할수록 정압계수가 약간 증가하는 것을 알 수 있다. 흡입면에서의 경우, 간극이 없는 경우는 $x/C_x=0.7$ 부근에서 최대값이 나타나지만, 말단 간극이 존재하는 경우는 최대값이 더 하류 쪽에 형성되며, 이는 말단 간극을 통한 누설유동의 영향 때문인 것으로 생각된다.

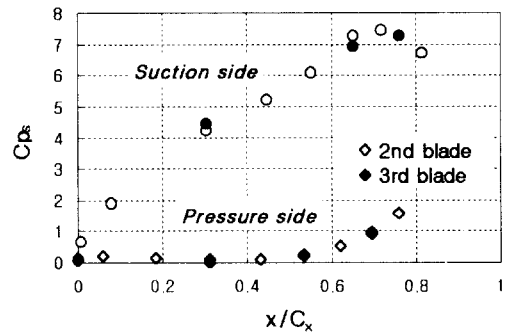


Fig. 3 Static pressure coefficients at mid-span on Blade 2 and 3

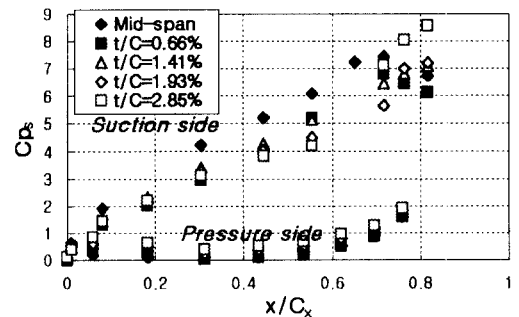


Fig. 4 Static pressure coefficients at 95% of blade span on Blade 2

3.2 열/물질전달특성

Fig. 5는 간극이 없는 경우 터빈 블레이드 끝벽(endwall)에서의 열/물질전달계수 분포를 보여주는 그림이다. 터빈 블레이드의 전연부근에서는 경계층 내의 속도구배로 인해 나타나는 말굽와류(horse-shoe vortex)가 형성되어 높은 물질전달계수가 나타나는 것을 알 수 있으며, 이러한 말굽와류는 블레이드 형상을 따라가면서 진행되는 것을 알 수 있다. 또한 압력면 쪽에서 형성된 말굽와류가 불균일한 압력장의 영향으로 인접 블레이드의 흡입면 쪽으로 밀리면서 하류로 진행하게 되며, $x/C=0.3$ 근방에서 말굽와류가 흡입면 쪽에 접촉하는 것을 알 수 있다. 또한 이러한 와류는 하류로 진행하면서 규모가 발달하여 하나의 큰 와류인 통과와류(passage vortex)를 형성하게 되어 흡입면 부근에서의 열/물질전달이 크게 증대된다.

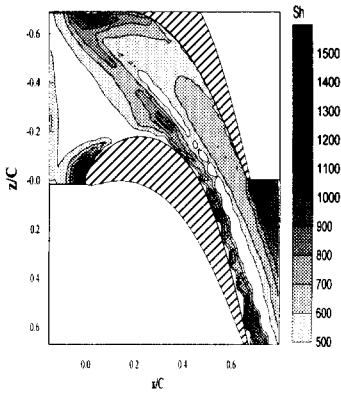


Fig. 5 Contour plot of Sh on endwall

압력면 쪽에서는 하향 유동이 발생하여 높은 열전달계수를 갖는 영역이 비교적 넓게 분포하는 것을 알 수 있으며, 이 두 영역 사이에 상대적으로 낮은 값을 보이는 영역이 존재한다. 블레이드의 후연(trailing edge) 부근에서는 유동이 빠져나가면서 후류를 형성하기 때문에 매우 높은 열/물질전달계수가 관찰된다.

3.2.1 말단간극 변화 효과

말단 간극이 존재하는 경우의 열/물질전달특성은 그렇지 않은 경우와 매우 상이한 경향을 나타낸다. 앞서서도 언급했듯이, 간극이 존재하는 경우 슈라우드에서의 열/물질전달 특성은 압력면과 흡입면 사이의 압력차로 인하여 발생하는 누설유동의 영향을 크게 받게 된다.

Fig. 6은 말단간극 변화시의 슈라우드에서의 열/물질전달계수 분포를 나타내는 그림이다. 간극이 매우 작은 경우(Fig. 6(a)), 블레이드 전연부근에서 말굽와류의 강도가 크므로 열/물질전달촉진 영역이 크게 나타나며, 이 와류가 하류로 진행하면서 통과와류로 발달하는 것을 알 수 있다. 또한 압력면을 따라가면서 간극 내로 유동의 유입·박리현상이 나타나므로 높은 열/물질전달계수가 나타났다. 하지만, 말단간극이 매우 작기 때문에 흡입면 부근에서 누설유동의 영향이 거의 나타나지 않으며, 간극이 없는 경우(Fig. 5)와 유사한 열/물질전달특성을 갖는 것으로 나타났다.

상대적으로 말단 간극이 큰 경우($t/C > 1.41\%$), 블레이드 전연부근에서의 열/물질전달계수가 간극이 작은 경우에 비해 낮은 값을 가지며, 통과와류의 궤적이 관찰되지 않는다. 압력면 영역에

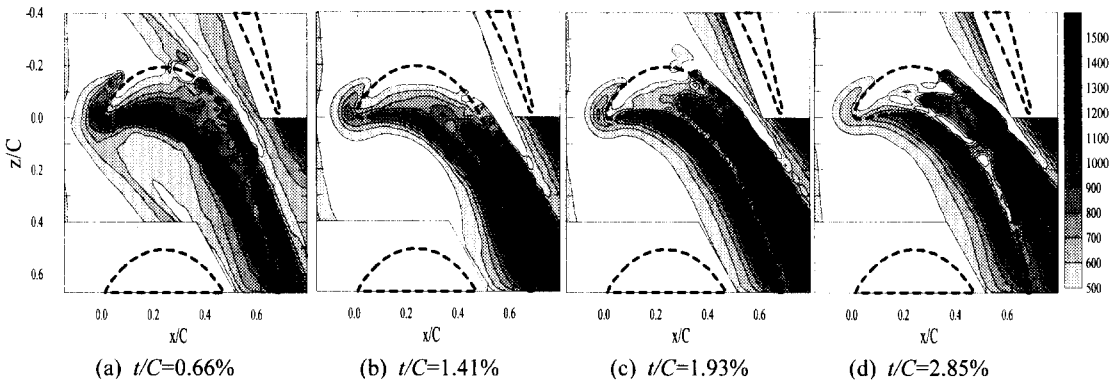


Fig. 6 Contour plots of Sh on shroud for various tip clearances

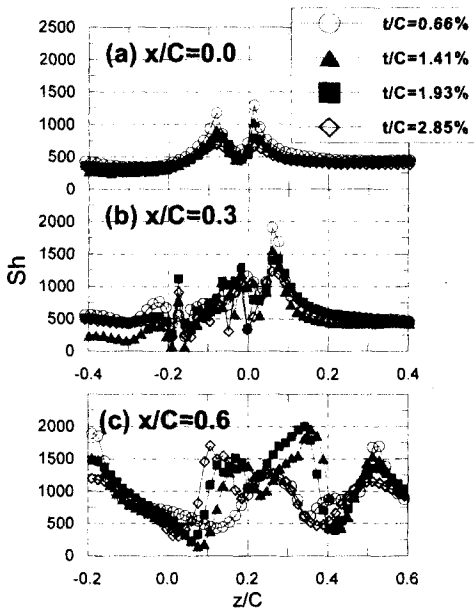


Fig. 7 Local distributions of Sh on shroud for various tip clearances

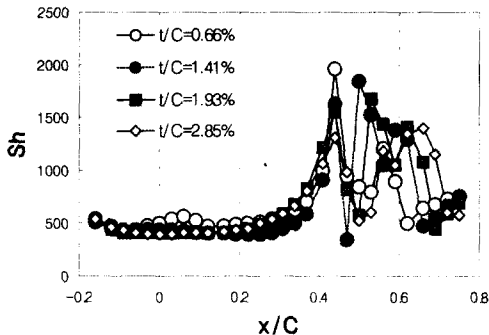


Fig. 8 Local distributions of Sh on shroud for various tip clearances at $z/C=0.2$

서는 유동의 유입효과(entrance effect)로 인하여 높은 열/물질전달계수가 나타나며, 간극이 커질수록 영향을 받는 영역이 증가한다.

블레이드 말단과 슈라우드 사이 간극 내부에서는 유동의 박리 및 재부착 등으로 인하여 매우 복잡한 열/물질전달 특성이 나타나며, 이러한 특성은 간극 크기의 영향을 많이 받는 것으로 나타났다. 특히, $t/C=1.41\%$ 와 $t/C=1.93\%$ 인 경우(Figs. 6(b),(c)), $0.2 < z/C < 0.4$, $0.5 < x/C < 0.6$ 인 영역에서 국소적으로 높은 열/물질전달계수가 나타나지만, 말단 간극이 더 큰 $t/C=2.85\%$ 인 경우 이러한 현상이 상당히 약

화된 것으로 나타났다.

간극 내로 유입된 유동은 블레이드의 흡입면 쪽으로 빠져나가면서 주유동과 상호작용을 일으키게 된다. 따라서, 흡입면 쪽에서 큰 누설와류가 형성되며, 이 누설와류의 궤적을 따라 열/물질전달 촉진영역이 형성된다.

$t/C=1.41\%$ 인 경우, 누설유동에 의한 열/물질전달 촉진영역이 $z/C=-0.1$, $x/C=0.4$ 부터 나타나지만, $t/C=2.85\%$ 인 경우 $z/C=-0.15$, $x/C=0.3$ 부근에서 나타나는 것을 알 수 있다. 이와 같이, 말단간극이 커짐에 따라, 누설와류의 궤적이 $z/C < 0$ 쪽으로 이동하며, 누설와류의 영향을 받는 영역이 증가한다. 이는 말단간극이 커질수록 누설유동의 유량 및 운동량이 증가하기 때문이다.

Fig. 7은 슈라우드에서의 국소 열/물질전달계수를 횡방향(z 축)으로 나타낸 그림이다. $x/C=0.0$ 인 경우(Fig. 7(a)), 말단간극이 작을수록 전연부근에서의 열/물질전달계수가 높게 나타나는 것을 알 수 있다. Fig. 7(b)를 보면 알 수 있듯이, 말단간극이 작을수록 압력면 부근에서의 열/물질전달 촉진영역이 감소하지만, 이 부근에서의 극대값은 커지는 것으로 나타났다. 이는 간극 내로 유입되는 유동의 속도와 연관되는 것으로 생각된다.

$x/C=0.6$ 의 경우(Fig. 7(c)), 말단간극이 매우 작은 경우에는 누설와류에 의한 열/물질전달 촉진영역을 관찰할 수 없으며, $z/C=0.3$ 부근에서 통로와류에 의한 극대값이 관찰된다. 말단간극이 증가하면서 누설와류에 의한 촉진영역이 형성된다. 이 영역에서의 극대값은 $t/C=1.41\%$ 인 경우 $z/C=0.2$ 부근에서 형성되지만, $t/C=2.85\%$ 인 경우에는 $z/C=0.1$ 부근에서 형성되어 말단간극이 커질수록 $z/C < 0$ 쪽으로 누설와류의 궤적이 이동하는 것을 알 수 있다.

Fig. 8은 말단간극변화에 따른 열/물질전달계수 분포를 종방향(x 축)으로 나타낸 그림이다. 앞에서 언급한 바와 같이, $x/C=0.45$ 부근에서 압력면 쪽에서의 유동 유입효과로 인하여 극대값이 나타나며, 이 극대값은 말단간극이 작을수록 크게 나타났다. 또한, 간극이 제일 작은 $t/C=0.66\%$ 인 경우 흡입면 쪽의 통로와류에 의한 촉진영역이 $x/C=0.55$ 근방에서 나타난다. 하지만 말단간극이 큰 경우, 두 개의 극대값이 존재하여 $x/C=0.5$ 근방에서 하나의 극대값이 나타나며, 이후 하류로 진행하면서 누설와류에 의한 다른 극대값이

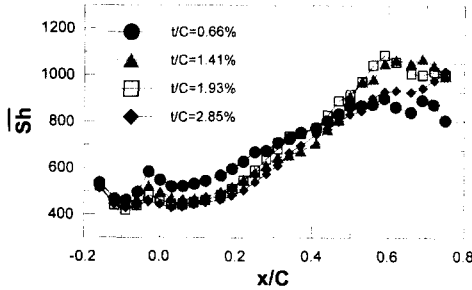


Fig. 9 Average Sh for various tip clearances

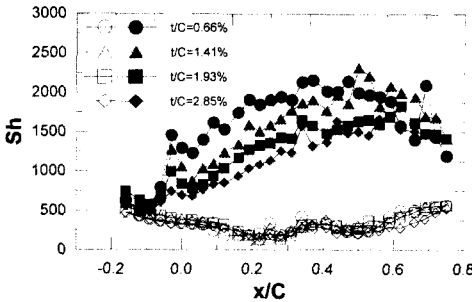


Fig. 10 Minimum and Maximum Sh for various tip clearances

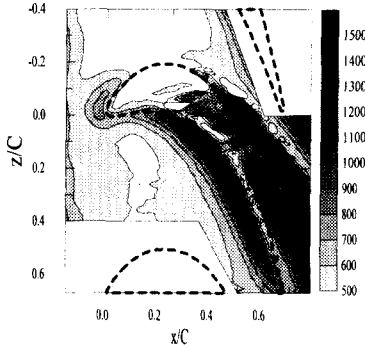


Fig. 11 Contour plot of Sh on shroud for $t/C=2.85\%$ at $T.I.=6\%$

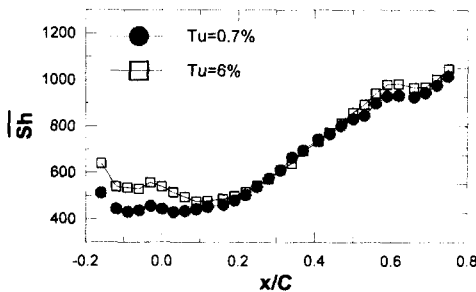


Fig. 12 Averaged Sh for $t/C=2.85\%$ at different turbulence intensity

$x/C=0.6$ 근방에서 형성되며, 간극이 커질수록 두 극대값 모두 하류방향으로 조금씩 이동하는 것을 알 수 있다.

Fig. 9는 말단간극변화에 따른 평균 열/물질전달 계수값을 나타내는 그림이다. 앞서서도 언급했듯이, 입구영역($x/C < 0.3$)에서는 간극이 제일 작은 경우($t/C=0.66\%$)가 말굽와류 및 통로와류의 영향으로 평균값이 제일 높게 나타났다. 하지만, 하류로 진행하면서, 말단간극이 제일 작은 경우는 누설유동의 유량이 상대적으로 적기 때문에 평균값이 제일 낮게 나타났다. 상대적으로 간극이 큰 경우($t/C=1.41\sim 2.85\%$), 평균값이 거의 비슷하지만 간극이 제일 큰 경우가 다른 경우에 비해 약간 낮은 값을 갖는 것으로 나타났다. 이는 간극이 큰 경우, $t/C=1.41\%$ 와 $t/C=1.93\%$ 인 경우에 나타나는 흡입면 쪽의 극대값이 감소하기 때문이다.

슈라우드의 경우, 블레이드가 지나가는 영역은 유입·누설유동으로 인하여 큰 열부하를 받게 되며, 블레이드와 블레이드 사이에 위치하는 영역은 상대적으로 작은 열부하를 받게 된다. 따라서, 블레이드의 회전으로 인하여 슈라우드에 주기적인 열부하가 가해지게 된다.

Fig. 10은 슈라우드 표면에서 열/물질전달계수의 최대값과 최소값을 나타낸 그림이다. 슈라우드에서 열/물질전달계수의 최대값은 최소값에 비해 약 4~5배 정도 높은 것으로 나타났다.

3.2.2 난류강도변화 효과

Fig. 11은 말단간극이 $t/C=2.85\%$ 인 경우, 주유동의 난류강도가 6%인 경우에 대한 물질전달계수 분포를 나타내는 그림이다. 주유동의 난류강도가 낮은 경우(Fig. 6(d))와 비교해보면, 난류강도 증가로 인하여 입구영역 및 블레이드 사이 유로에서 열/물질전달계수가 약간 증가한 것을 알 수 있다. 하지만, 전반적인 열/물질전달특성은 난류강도가 낮은 경우와 거의 동일하며, 유입·누설유동에 의해 열/물질전달이 촉진된 영역은 난류강도의 영향이 거의 없는 것으로 나타났다.

Fig. 12는 말단 간극이 $t/C=2.85\%$ 인 경우, 주유동의 난류강도변화에 따른 평균 열/물질전달계수값을 나타내는 그림이다. 앞서 언급한 바와 마찬가지로, 난류강도가 높은 경우가 입구영역 ($x/C < 0.1$)에서 비교적 높은 값을 나타내지만, 하류로 진행하면서 그 차이가 거의 없는 것으로 나타났다.

4. 결 론

본 연구에서는 블레이드 말단과 슈라우드 사이 말단 간극 변화에 따른 슈라우드에서의 국소 열/물질전달특성을 고찰하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 블레이드 말단과 슈라우드 사이에 간극이 존재하는 경우, 압력면 부근에서는 유동 유입효과로 인하여 열/물질전달 촉진영역이 관찰된다. 블레이드 말단과 슈라우드가 겹쳐있는 영역에서는 유동의 박리 및 재부착 등으로 인하여 극대값을 갖는 매우 복잡한 열/물질전달 특성이 관찰되었다. 흡입면을 통해 빠져나온 누설유동은 누설 와류를 형성하며, 이 와류의 궤적을 따라가면서 흡입면 부근에 높은 열/물질전달 촉진영역이 형성된다.

(2) 말단 간극이 증가함에 따라 블레이드 전연 부근에서의 촉진영역은 감소하지만, 누설유동의 유량이 증가하여, 누설와류의 영향을 받는 영역이 증가하며, 와류의 궤적이 $z/C < 0$ 쪽으로 이동하는 것으로 나타났다. 하지만, 평균 열/물질전달 계수는 말단 간극이 매우 작은 경우를 제외하고는 영향을 거의 받지 않는 것으로 나타났다.

(3) 주유동의 난류강도 변화에 따른 영향은 입구영역을 제외하면 거의 관찰되지 않았다.

후 기

본 연구는 학술진흥재단 협동연구과제(과제번호:KRF-99-042-E0005) 및 과학기술부 국가지정연구실 사업의 지원에 의한 결과이며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Metzger, D. E., Dunn, M. G. and Hah, C., 1991, "Turbine Tip and Shroud Heat Transfer," Trans. ASME, Journal of Turbomachinery, Vol. 113, pp. 502~507.
- (2) Bunker, R. S., Bailey, J. C. and Ameri, A. A.,

1999, "Heat Transfer and Flow on the First Stage Blade Tip of a Power Generation Gas Turbine Part 1:Experimental Results," ASME Paper No. 99-GT-169.

- (3) Ameri, A. A. and Bunker, R. S., 1999, "Heat Transfer and Flow on the First Stage Blade Tip of a Power Generation Gas Turbine Part 1:Simulation Results," ASME Paper No. 99-GT-283.
- (4) 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 Paper No. 2000-GT-194.
- (5) 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 Paper No. 2000-GT-195.
- (6) Dunn, M. G. and Haldeman, C. W. 2000, "Time-averaged Heat Flux for a Recessed Tip, Lip, and Platform of a Transonic Turbine Blade," ASME Paper No. 2000-GT-197.
- (7) 이동호, 김병기, 조형희, 1999, "분사각도변화에 따른 단일 막냉각홀 주위에서의 열/물질전달 및 막냉각효율 특성," 대한기계학회논문집(B) 제 22권 제10호 pp. 1434~1445.
- (8) Ambrose, D., Lawrenson, I. J. and Sparke, C. H. S., 1975, "The Vapor Pressure of Naphthalene," *J. Chem. Thermo.*, Vol. 7, pp. 1173~1176.
- (9) 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.
- (10) Eckert, E. R. G., 1976, *Analogies to Heat Transfer Processes, in Measurements in Heat Transfer*, ed. Eckert, E. R. G. and Goldstein, R. J., pp. 397~423, Hemisphere Pub., New York
- (11) Kline, S. J. and McClintock, F., 1953, "Describing Uncertainty in Single Sample Experiments," *Mech. Eng.* Vol. 75, pp. 3~8.