

베인과 블레이드 사이의 상대위치 변화에 따른 터빈 블레이드 표면에서의 열/물질전달 특성

이동호* · 조형희**

Effect of Relative Position of Vane and Blade on Heat/Mass Transfer Characteristics on Stationary Turbine Blade Surface

Dong-Ho Rhee* and Hyung Hee Cho**

Key Words: Turbine Blade (터빈 블레이드), Annular cascade (환형 익렬), Relative position (상대위치), Heat/Mass transfer (열/물질전달), Tip leakage flow (팁 누설유동), Naphthalene sublimation technique (나프탈렌 승화법)

ABSTRACT

The present study investigated the effect of relative position of the blade on blade surface heat transfer. The experiments were conducted in a low speed wind tunnel with a stationary annular turbine cascade. The test section has a single turbine stage composed of sixteen guide vanes and blades. The chord length of the blade is 150 mm and the mean tip clearance of the blade is 2.5% of the blade chord. The Reynolds number based on blade inlet velocity and chord length is 1.5×10^5 and mean turbulence intensity is about 3%. To investigate the effect of relative position of blade, the blade at six different positions in a pitch was examined. For the detailed mass transfer measurements, a naphthalene sublimation technique was used. In general, complex heat transfer characteristics are observed on the blade surface due to various flow characteristics, such as a laminar flow separation, relaminarization, flow acceleration, transition to turbulence and tip leakage vortices. The results show that the blade relative position affects those heat transfer characteristics because the distributions of incoming flow velocity and turbulence intensity are changed. Especially, the heat transfer pattern on the near-tip region is significantly affected by the relative position of the blade because the effect of tip leakage vortex is strongly dependent on the blade position. On the pressure side, the effect of blade position is not so significant as on the suction side surface although the position and the size of the separation bubble are changed.

* 연세대학교 기계공학과

** 연세대학교 기계공학과

책임저자 E-mail : hhcho@yonsei.ac.kr

1. 서론

가스터빈엔진은 성능향상을 위하여 지속적으로 터빈입구온도가 증가되어 왔으며, 이로 인해 연소실, 터빈과 같이 가스터빈엔진의 고온부에서의 열부하 또한 계속 증가되어 왔다. 이 중 터빈 블레이드는 연소실, 베인 (vane)과 함께 열부하가 큰 대표적인 요소 중 하나이다. 특히, 터빈 블레이드는 고온의 환경에서 고속으로 회전하는 등 매우 열악한 환경에서 작동하며 블레이드 팁과 슈라우드 사이의 끝틈새 (tip clearance)를 통한 누설유동 (leakage flow)의 영향으로 매우 불균일하고 높은 열부하를 받는다.

이와 같은 터빈 블레이드의 성능 및 내구성 향상을 위해서는 다양한 냉각방식의 연구개발 및 적용과 더불어 여러 조건에 대한 블레이드 온도 및 열응력 해석이 필요하다. 이러한 열해석을 위해서는 요소 표면에서의 열전달계수 분포 등 국소 열전달 특성을 고찰하는 것이 필수적이다.

블레이드 미드스팬, 즉 2차원적인 유동특성을 갖는 영역 및 끝벽 (endwall) 부근에서의 열전달 특성에 대한 연구는 과거부터 많이 이루어져 왔다^{(1)~(9)}. 이와 함께, 블레이드 팁 인접영역의 경우 끝틈새를 통한 누설유동으로 인해 열부하가 크고 열전달 특성 또한 매우 복잡하게 나타나기 때문에 최근에는 블레이드 팁 인접부를 포함한 영역에서의 열전달 특성에 대한 연구가 이루어지고 있다.

Kwak and Han⁽¹⁰⁾은 감온성 액정 (TLCs)을 이용하여 블레이드 팁과 블레이드 표면, 슈라우드 (shroud)에서의 국소적인 열전달 계수를 측정하여 블레이드 팁 인접부에서 누설유동이 블레이드 및 슈라우드에서의 열전달에 미치는 영향을 고찰하였다. Jin and Goldstein⁽¹¹⁾은 나프탈렌 승화법을 이용하여 블레이드 팁 및 블레이드 표면에서의 국소 열전달 특성을 고찰하였으며, 통로 와류 (passage vortex) 및 팁 누설와류 (tip leakage vortex)의 영향에 대하여 분석하였다.

권현구 등⁽¹²⁾과 이상우와 권현구⁽¹³⁾는 블레이드 끝틈새가 존재하는 경우 팁 인접부 블레이드 표면에서의 국소 열전달 특성을 고찰하였다. 그 결과 끝틈새를 통해 흐르는 누설유동에 의해 블레이드 팁에서의 열부하가 매우 크게 증가하며, 블레이드 끝벽과 미드스팬 영역에 비해서 열부하가 크다는 것을 밝혀냈다.

이동호와 조형희^{(14),(15)}는 환형 익렬 내 고정된 블레이드에 대하여 블레이드 표면, 팁, 슈라우드에서의

국소 열전달 특성을 고찰하여 블레이드 및 슈라우드에서의 열전달에 대한 누설유동의 영향에 대하여 연구하였다. 그 결과 블레이드 표면에서는 매우 복잡한 열전달 특성을 가지며, 특히 흡입면 측에서 두 개의 누설 와류가 발달하여 블레이드 표면 및 슈라우드 표면의 열전달에 영향을 끼치는 것을 밝혀냈다.

지금까지의 연구들은 주로 균일한 유동장이 블레이드에 유입되는 경우에 대하여 수행되어 왔다. 하지만, 실제 블레이드로 유입되는 유동장은 블레이드 상류에서의 여러 조건에 의해 영향을 받기 때문에 이에 따른 유동장 변화 및 열전달 특성에 대한 고찰이 필요하다.

블레이드 주위에서의 유동 및 열전달 특성에 영향을 주는 인자로는 베인 후연 (trailing edge)에서 발생하는 후류, 끝벽에서의 와류, 비정상성 난류, 베인과 블레이드의 상대 위치 변화에 따른 영향 등을 들 수 있다. 특히, 블레이드는 회전을 하기 때문에 Fig. 1에 제시된 바와 같이 베인과의 상대위치가 주기적으로 변화하게 되는데, 이러한 현상은 베인 출구에서의 단면적 변화효과를 가져오기 때문에 블레이드 위치변화에 따라 블레이드로 유입되는 유동의 특성이 변화하게 된다.

본 연구에서는 블레이드의 열전달 특성에 영향을 미치는 여러 가지 인자 중에서 베인과 블레이드의 상대 위치 변화가 터빈 블레이드 표면의 열전달에 미치는 영향에 대하여 고찰하였다. 특히, 미드스팬 (mid-span)에서부터 3차원의 복잡한 유동장이 형성되는 블레이드 팁 인접영역 (near-tip region)에 대한 열전달 특성을 고찰하였다.

이를 위해 환형 터빈 익렬에서 상류 베인에 대한 블레이드의 상대적 위치를 변화시켜가면서 그에 따른 블레이드의 표면에서의 국소 열/물질전달 특성을 고찰하였다. 블레이드 표면에서의 국소 열/물질전달계수를 측정하기 위해 물질전달실험방법 중의 하나인 나프탈렌 승화법을 이용하여 실험을 수행하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

Fig. 2는 본 실험에 사용된 실험장치의 개략도를 나타내는 그림이다. 본 실험에는 환형 터빈 익렬이 장착된 저속 풍동이 사용되었다. 본 실험장치는 크게 상류 팬, 1단 터빈 시험부, 하류 흡입팬 등 세 부분으로 나누어지며, 본 연구에서는 상류 팬만을 이용하여 유동

베인과 블레이드 사이의 상대위치 변화에 따른 터빈 블레이드 표면에서의 열/물질전달 특성

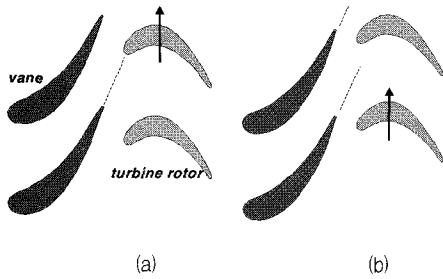


Fig. 1 Different opening areas at vane exit with different blade positions : (a) maximum opening area and (b) minimum opening area

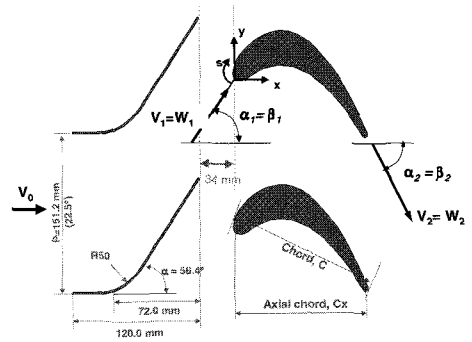


Fig. 3 Schematic view of guide vane and blade

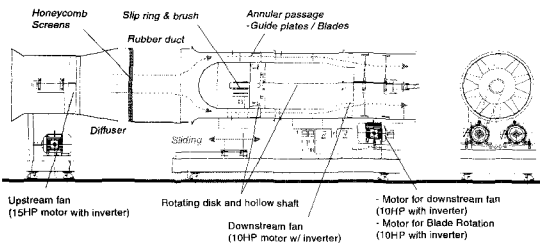


Fig. 2 Schematic view of experimental apparatus

을 발생시켰다. 상류 팬을 통해 유입된 유동은 정체실 (plenum chamber)을 지나 환형 유로로 유입되고, 이후 시험부, 즉 베인과 블레이드를 지난 후 외부로 배출된다. 정체실은 직경 1,000 mm의 고무관으로 제작되었으며, 유동의 안정화를 위하여 정체실 내부에 스크린과 벌집구조 (honeycomb)를 설치하였다. 환형 유로는 외경 900 mm, 내경 640 mm이며, 유로의 높이는 130 mm이다.

시험부에는 베인과 블레이드가 각각 16개씩 설치되어 있으며, 베인은 환형 유로 입구로부터 540 mm 떨어진 곳에, 블레이드는 베인으로부터 34 mm 떨어진 곳에 위치하도록 제작하였다.

베인 입구에서의 유속을 측정하기 위해 환형 유로 내 베인의 상류에 두 개의 피토크관 (pitot tube)을 설치하였으며, 총 6개의 J-type 열전대를 환형 유로에 설치하여 실험 중 유입유동의 온도를 측정하였다. 또한, 블레이드 표면에서의 압력분포 특성을 관찰하기 위하여 나프탈렌 코팅된 블레이드 시편 좌우의 블레이드 미드스팬 표면에 정압 탭을 설치하여 실험 중 미드스팬에서의 정압을 측정하였다.

블레이드 표면에서의 온도 및 압력측정 결과를 획득하기 위해 Fig. 2에 표시된 것과 같이 20채널 슬립 링을 실험장치 내부에 설치하였다.

Table 1 Blade configuration

Number of blades	16	
Chord length (C)	150 mm	
Axial chord (Cx)	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	
Vane/blade spacing	34 mm (0.23C)	
Radius at mid-span	385 mm	
hub/tip radius ratio	0.711	
Blade inlet / exit angle	$\beta_1=56.4^\circ$ / $\beta_2=-62.6^\circ$	
Mean tip clearance (t)	3.8 mm (t/C=2.5%, t/l=2.9%)	

2.2 베인 및 터빈 블레이드

앞서 언급한 바와 같이 시험부는 1단 터빈을 모델로 하여 각각 16개의 베인과 블레이드로 구성되며, Fig. 3에 미드스팬 기준 단면도가 제시되어 있다.

베인은 후연에서의 후류 발생 효과를 최소화하기 위하여 두께 약 1.3 mm의 얇은 철판으로 제작하였으며, 출구각도는 56.4°로 블레이드 입구각도와 같도록 하였다.

터빈 블레이드는 GE 7FA 1단 블레이드의 미드스팬 형상을 기준으로 하였으며, 스팬방향으로 동일한 형상을 갖는 선형 익형으로 제작하였다. 블레이드의 익현길이 (chord length)는 150 mm, 미드스팬 기준 블레이드 사이 간격은 1.01C이다. 본 실험에 사용된 블레이드 형상에 대한 자세한 정보는 Table 1에 제시되어 있다.

블레이드의 틱은 평면이며, 압력면 측으로 3.8 기울

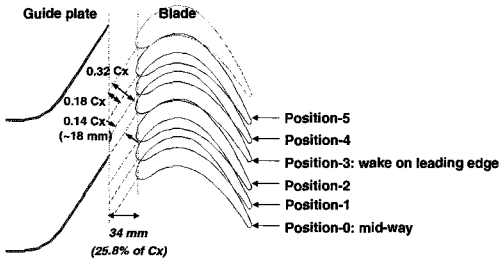


Fig. 4 Relative positions between guide plate and blade for stationary cases

어진 팁 형상을 갖는다. 따라서, 끝틈새는 축 방향을 따라가면서 틈새는 약 2 mm에서 6 mm까지 변화하게 되며, 압력면 측이 흡입면 측에 비해 상대적으로 큰 틈새를 갖는다. 평균 틈새는 약 3.8 mm로 익현길이 대비 약 2.5%이다. 축방향 블레이드 끝틈새 분포는 이동호와 조형희⁽¹⁴⁾에 제시되어 있다.

본 실험에서는 표면에서 물질전달계수를 측정하기 위한 블레이드 시편과 유로 내 유동의 균일성을 확보하기 위한 블레이드 등 두 종류의 블레이드를 제작, 사용하였다. 물질전달계수 측정용 블레이드 시편은 알루미늄으로 제작하였으며, 팁에서 미드스팬 아래쪽 15 mm 까지 나프탈렌이 코팅되도록 설계하였다. 블레이드 시편의 자세한 사양은 이동호와 조형희⁽¹⁴⁾에 제시되어 있다. 나머지 15개의 블레이드는 주조를 통해 알루미늄으로 제작, 설치하였다.

2.3 베인에 대한 블레이드 상대위치

본 연구에서는 베인과 블레이드 사이의 상대위치 변화에 따른 영향을 고찰하기 위하여 Fig. 4에 제시된 바와 같이 한 피치 내에서 블레이드의 위치를 총 6가지로 변화시켜가며 실험을 수행하였다.

Position-0은 블레이드의 전연(leading edge)이 베인과 베인 사이 정 중앙(mid-way)에 위치하는 것을 의미하며, Position-1과 Position-2는 $y > 0$ 방향으로 각각 Position-0과 Position-1의 위치에서 3.4° 씩 회전한 위치를 나타낸다.

Position-3은 블레이드의 전연과 베인 후연에서 가상의 선을 연장한 것이 일치하는 위치를 나타내며, Position-4와 Position-5는 Position-3으로부터 $y > 0$ 방향으로 각각 3.4° , 6.8° 회전한 위치를 나타낸다. 이와 같이 총 6곳의 블레이드 위치에 대해서 고정된 블레이드 표면에서의 열/물질전달 특성을 고찰하였다.

Table 2 Operating conditions

Inlet flow velocity (V0) / mean Tu	8.3 m/s / ~9%
Vane exit angle	56.4°
Mean vane exit flow velocity (V1)	15.0 m/s
Mean blade inlet velocity (W1) / Tu	15.0 m/s / ~3%
ReC	1.5×10^5

2.4 유동 및 압력 측정

블레이드 표면에서의 정압 측정을 위해 FCO-44 차동 압력 변환기(differential pressure transducer, 250 mmH₂O, Dwyer, Inc.)를 디스크 내부에 설치하였다. 또한, 베인 출구 하류에서의 유동의 유속 및 난류강도를 측정하기 위하여 IFA-300 열선 유속계(Hot-wire anemometry)와 I-형 프로브(probe)를 이용하였다. 이때, 검출률(sampling rate)을 4,000 Hz로 총 12,288개의 데이터를 획득, 평균하여 사용하였다.

2.5 실험 조건

본 실험은 블레이드 입구에서의 유입유동 레이놀즈 수를 $Re_c = 1.5 \times 10^5$ 로 고정시키고 실험을 수행하였다. 본 실험에 사용된 풍동에서는 베인 입구에서 완전 발달된 난류경계층이 형성되며, 이때 경계층의 두께는 약 15 mm이고 주유동의 난류강도는 약 9%이다. 이후 유동이 베인을 지나면서 가속되어 베인 출구 하류 10 mm 지점에서의 경계층 두께는 약 5 mm, 난류강도는 약 3%로 감소한다. 블레이드 입구 유동에 대한 자세한 측정결과는 이동호와 조형희⁽¹⁴⁾에 제시되어 있다.

실험 중 블레이드 입구 레이놀즈 수는 베인 입구에서 측정된 유속으로부터 계산하였다. 자세한 운전조건은 Table 2에 제시되어 있다.

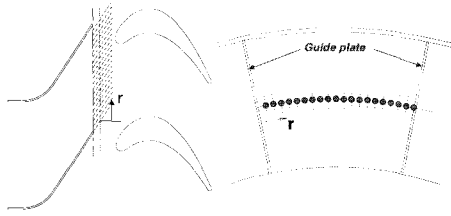
3. 열/물질전달계수

3.1 물질전달계수

국소물질전달계수는 다음과 같이 정의된다.

$$h_m = \rho_s (dy / d\tau) / (\rho_{v,w} - \rho_{v,\infty}) \quad (1)$$

베인과 블레이드 사이의 상대위치 변화에 따른 터빈 블레이드 표면에서의 열/물질전달 특성



여기서, ρ_s 는 고체 나프탈렌의 밀도, dy 는 실험 중 나프탈렌 승화깊이, $d\tau$ 는 실험시간, $\rho_{v,w}$ 는 표면에서의 나프탈렌 포화증기밀도, $\rho_{v,\infty}$ 는 주유동의 나프탈렌 포화증기밀도를 나타낸다. 본 실험의 경우 주유동은 나프탈렌을 포함하지 않기 때문에 $\rho_{v,\infty}=0$ 으로 하였다

물질전달계수의 무차원수인 Sh 수는 다음과 같이 정의된다.

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

여기서, 공기 중 나프탈렌 확산계수인 D_{naph} 는 Goldstein and Cho⁽¹⁶⁾에 의해 제시된 값을 이용하였다.

본 연구에서의 불확실성 해석은 Kline and McClintock⁽¹⁷⁾의 방법을 이용하여 이루어졌으며, 95%의 신뢰도에 대해서 약 $\pm 7.4\%$ 인 것으로 나타났다. 물질 전달계수는 열과 물질전달 사이의 유사성을 이용하여 열전달계수로 전환될 수 있으며, 이에 대한 결과는 이동호와 조형희⁽¹⁴⁾에 제시되어 있다.

3.2 측정 장치 및 방법

터빈 블레이드 표면에서의 국소 물질전달계수를 측정하기 위해서는 식 (1)에 제시된 바와 같이 나프탈렌 승화 깊이를 알아야 하며, 이는 실험 전과 후 시편 표면의 나프탈렌 표면고도를 측정함으로써 얻을 수 있다. 본 연구에서는 측정하고자 하는 블레이드 표면이 곡면이기 때문에 3축의 직선이송장치에 선형가변차동변환기(LVDT; linear variable differential transformer)를 연결하고 1축의 회전 테이블에 블레이드 시편을 장착하여 측정하였다. LVDT 및 4축 측정 장비의 자세한 사양은 Rhee⁽¹⁸⁾에 제시되어 있다.

4. 실험 결과 및 토의

4.1 블레이드 입구 유동 특성

Fig. 5는 베인 출구 하류 10 mm 지점, 즉 블레이드 입구면의 24 mm 상류지점에서 미드스팬에서의 유속 및 난류강도 분포를 나타내는 그림이다. 블레이드 유입유동은 4곳의 블레이드 위치에 대해서 측정되었다. 여기서 실선은 2차원 형상에 대한 수치해석결과를 나타내며, 화살표는 측정 면에 대한 블레이드 전연의 위치를 나타낸다.

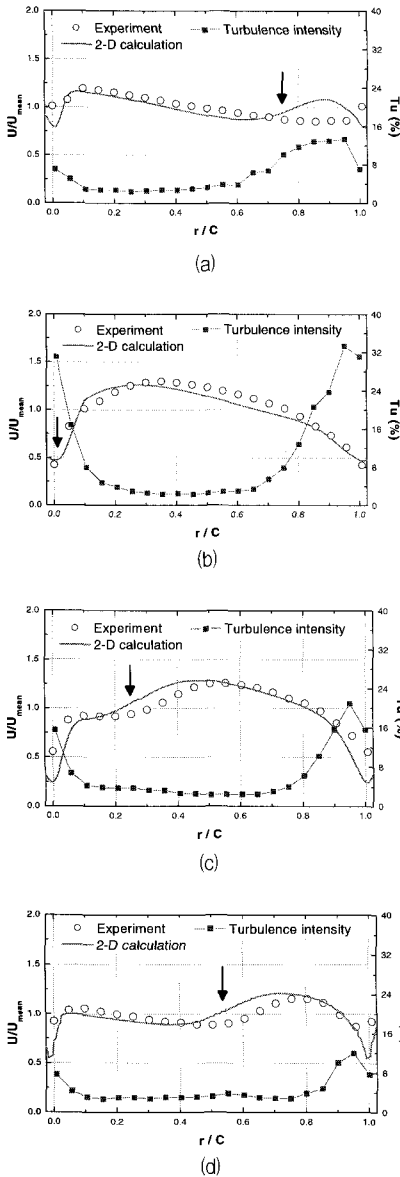


Fig. 5 Velocity distributions along the mid-span between the two adjacent vanes : (a) Position-0, (b) Position-2, (c) Position-3 and (d) Position-5

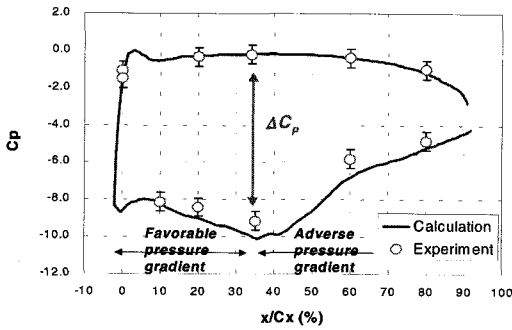


Fig. 6 Distribution of static pressure coefficients along the blade mid-span at Position-5

모든 경우, 베인의 후연 하류에서는 후류의 영향으로 인해 유속은 평균 유속의 약 50~70% 정도이며, 주유동 평균 난류강도인 약 3%에 비해 높은 난류강도가 나타난다. 또한, 블레이드의 위치에 따라 유속 및 난류강도 분포가 달라지는 것을 알 수 있다.

Position-0의 경우, $r/C > 0.75$ 인 영역(블레이드 전연부에서 흡입면 측)은 베인의 후연($r/C \approx 1.0$)과 블레이드의 전연 사이의 거리가 가까기 때문에 유동에 대한 저항이 상대적으로 크다. 따라서, 상대적으로 유로 면적이 큰 영역($r/C < 0.75$)에서 유속이 높게 나타나는 반면, 블레이드의 전연부와 후연부 인접영역에서는 유속이 낮고 난류강도가 높게 나타난다.

Position-2의 경우, 베인 후연과 블레이드의 전연에 의한 유동방해 효과가 다른 경우들에 비해 매우 크기 때문에 블레이드 전연 상류에서의 유속은 평균유속의 약 50% 수준인 반면 난류강도는 약 30%까지 증가하는 것으로 나타났다.

Position-3과 Position-5의 경우도 위와 동일한 특성을 보이지만, 다른 경우에 비해 유속 및 난류강도 분포의 변화가 심하지 않은 것을 알 수 있다. 특히, Position-5인 경우가 가장 균일한 유동장이 형성되는 것으로 나타났기 때문에 정압 분포 및 기본 열전달 특성은 Position-5인 경우에 대해서 고찰하였다.

Fig. 6은 Position-5인 경우 블레이드 표면에서의 정압계수 분포를 나타내는 그림이다. 여기서 실선은 3차원 수치해석 결과를 나타낸다. 정압계수는 다음과 같이 정의된다.

$$C_p = (P_s - P_0) / 0.5 \rho V_0^2 \quad (3)$$

Fig. 6에서 제시된 바와 같이, 블레이드의 양면 사

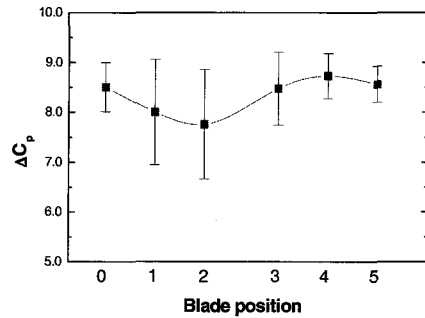


Fig. 7 ΔC_p distribution for various relative positions of blade

이의 압력차에 의해 블레이드 팁에서 누설유동이 발생하게 된다. 압력면에서는 정압계수 분포가 전체적으로 균일한 반면, 흡입면 측에서는 상류 쪽에서 유동 가속과 함께 정압이 급격히 감소한 뒤 하류로 진행하면서 서서히 압력을 회복하는 역압력 구배를 갖는다. 따라서, 유동 가속구간에서는 정체점에서의 층류경계층이 유지되다가 역압력구배를 갖는 영역에서 난류로의 천이현상이 발생하는 것을 예측할 수 있으며, 이러한 현상은 열전달 특성에서 확인할 수 있다.

또한, 수치해석의 결과를 살펴보면 전연 부근 압력면 표면에서 극소값이 나타나는 것을 볼 때, 이 영역에서 박리기포(separation bubble)가 형성될 것으로 예상된다.

블레이드 양면 사이의 압력차는 $x/C_x = 0.34$ 에서 최대값을 가지며, 본 실험에서는 블레이드 주위 유동의 반복성 및 블레이드 상대위치 변화에 따른 유동특성을 간접적으로 파악하기 위해 $x/C_x = 0.34$ 에서의 정압계수의 차(ΔC_p)를 측정하였다.

Fig. 7은 블레이드 상대위치 변화에 따른 ΔC_p 를 보여주는 그림이다. 여기서, 각각의 경우 300~400개의 측정 결과를 평균하였으며, 오차막대는 측정결과에 대한 2σ 의 크기를 나타낸다.

그 결과, 블레이드의 위치변화에 따라 최대 정압계수의 차가 주기적으로 변화하는 것으로 나타났으며, Position-1과 Position-2의 경우 섭동성분이 매우 큰 것으로 나타났다. 반면, Position-5의 경우, 유속분포 결과에서 언급한 것과 마찬가지로 매우 안정된 값을 갖는 것을 알 수 있다.

이와 같이, 베인에 대한 블레이드의 상대위치 변화에 따라 유동특성이 크게 변화하게 되며 이러한 변화는 국소 열/물질전달 특성에 매우 큰 영향을 줄 것으로 예상된다.

베인과 블레이드 사이의 상대위치 변화에 따른 터빈 블레이드 표면에서의 열/물질전달 특성

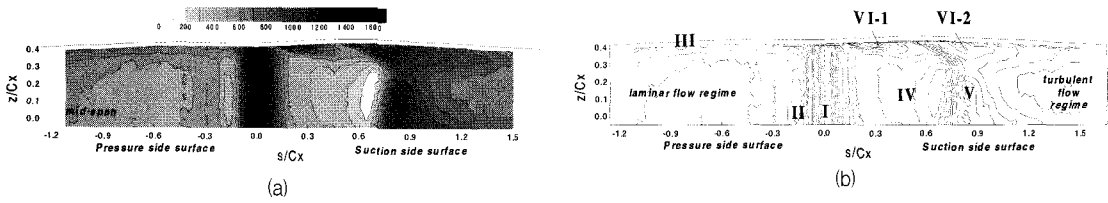


Fig. 8 Local heat/mass transfer characteristics on the blade surface for Position-5 at $ReC=1.5 \times 10^5$: (a) mass transfer distribution and (b) classification of flow regimes on the surface

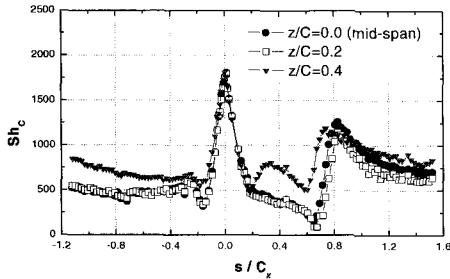


Fig. 9 Local distributions of Sh_c on blade surface for Position-5 at $ReC=1.5 \times 10^5$

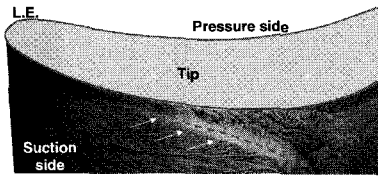


Fig. 10 Oil-lampblack flow visualization on blade suction surface(14)

4.2 국소 열/물질전달 특성

4.2.1 블레이드 표면에서의 열전달 특성

Fig. 8과 9는 블레이드가 Position-5에 위치하는 경우 국소 열/물질전달계수 분포 및 특성을 나타내는 그림이다. 여기서 점선으로 표시된 곳은 $z/C_x = 0.0$ 인 블레이드 미드스팬 위치를 나타내며, 외곽선은 블레이드 표면의 전개도 형상을 나타내는 것이다.

블레이드 표면에서의 열전달 특성은 아래와 같은 유동 특성으로 결정되며, 이러한 유동 특성에 영향을 받는 영역을 Fig. 8(b)에 표시하였다.

- 1) 전연 영역의 정체점
- 2) 압력면에서의 박리기포
- 3) 압력면 팁에서의 유동유입효과

- 4) 유동가속 및 층류경계층
- 5) 난류유동으로의 천이
- 6) 흡입면 팁에서의 누설유동/외류

블레이드 전연에서는 유입 유동이 정체점을 형성하기 때문에 매우 높은 열전달계수가 관찰된다. 이후 유동이 압력면과 흡입면 측으로 이동하면서 층류경계층 유동을 형성하게 된다.

압력면에서는 전연 부근 ($s/C_x \cong -0.2$)에서 박리기포가 형성되면서 유동의 천이현상이 발생하기 때문에 국소적으로 낮은 열/물질전달 영역이 형성되고 이후 다시 극대값을 갖는 분포를 갖는다. 하지만, 하류로 진행하면서 유동이 안정화되면서 재 층류화되기 때문에 균일한 열/물질전달계수 분포를 갖는 것으로 나타났다.

압력면 측 팁 부근에서는 유동이 끝틈새 내로 유입되면서 가속되기 때문에 미드스팬 부근에서의 값에 비해 열/물질전달계수가 높은 것을 알 수 있다.

흡입면 미드스팬 부근 ($z/C_x \leq 0.3$)에서는 유동이 급격히 가속되기 때문에 전연부근에서의 층류 경계층이 계속 유지되어 낮은 열/물질전달계수를 갖지만, 이후 표면에서의 유동이 난류로 천이되면서 $s/C_x = 0.8$ 부근에서 극대값을 갖게 된다. 그 이후로는 난류경계층이 발달하면서 서서히 열/물질전달계수가 감소하는 분포를 갖는다.

흡입면 팁 부근에서는 누설유동에 의해 열/물질전달이 증가되는데, 특히, 전연면 부근에서 작은 촉진영역 (VI-1, Fig. 8(b))이 형성되고, $s/C_x = 0.5$ 부근에서 다른 하나의 촉진영역 (VI-2, Fig. 8(b))이 발생하기 시작한다. 이것은 흡입면 측으로 빠져 나오는 끝틈새 누설 유동이 상류 측과 하류 측 두 갈래로 나누어지기 때문이다. Fig. 10의 유막가시화 결과에서도 이러한 유동 특성을 간접적으로 확인할 수 있다. 팁 인접영역에서의 국소 열전달 특성에 대한 자세한 설명은 이동호와 조형희^{(14),(15)}에 제시되어 있으며, 권현구 등⁽¹²⁾과 이상우와 권현구⁽¹³⁾에 의해서도 동일한 열전달 특

성이 보고되었다. 이때 하류 측 누설유동에 의한 열/물질전달계수는 정체점에서의 열/물질전달계수의 약 70% 정도에 달하는 것으로 나타났으며, 이러한 결과로부터 흡입면 측 블레이드 팁 부근에서는 누설유동으로 인해 열부하가 상당히 크다는 것을 알 수 있다.

이 밖에도, 일반적으로 블레이드 후연에서는 유동의 박리, 와류 유출 (vortex shedding)과 같은 현상이 발생하기 때문에 열전달계수가 급격히 감소한 뒤 다시 크게 증가하는 현상을 갖는 것으로 알려져 있다^{(12),(13)}. 하지만, 본 연구에서는 측정 상의 어려움으로 인하여 블레이드 후연인접부에서는 물질전달계수를 측정하지 않았기 때문에 이러한 열전달 특성은 관찰되지 않았다.

4.2.2 상대위치 변화에 따른 국소 열전달 특성

Fig. 11은 블레이드 상대위치 변화에 따른 블레이드 표면에서의 열/물질전달계수 분포를 나타내는 그림이다. 블레이드의 위치가 변화하더라도 앞서 설명했던 전체적인 열/물질전달 특성은 유지된다. 하지만, 위치 변화에 따라 열/물질전달 촉진영역의 범위 혹은 열전달계수의 크기가 변화하게 된다.

Position-0의 경우 (Fig. 11(a)), 전체적인 열/물질

전달 특성은 Position-5의 경우와 동일하다. 압력면에서 박리기포, 팁 인접부의 유동가속 등으로 인한 특성이 관찰되었으며, 흡입면에서는 유동의 가속 및 천이, 누설유동에 의한 특성이 동일하게 관찰되었다.

하지만, 흡입면 팁 인접영역에서는 Position-0의 경우가 Position-5의 경우에 비해 상류 측 누설유동의 영향(VI-1)이 큰 것으로 나타났다. 이것은 블레이드의 위치변화에 따라 유동의 유속분포가 변화하기 때문이다. Figs. 5 (a)와 (d)를 비교해보면, Position-0의 경우가 전연을 기준으로 했을 때 블레이드의 흡입면 측으로 유입되는 유동의 유속이 상대적으로 낮은 것을 알 수 있다. 이것은 Position-0의 경우가 압력면 측 끝틈새를 통해 유입되는 유동이 Position-5의 경우에 비해 상대적으로 더 많다는 것을 의미한다. 따라서 흡입면의 상류 측에서 빠져 나오는 누설유동의 영향이 Position-5의 경우에 비해 크고, 이와 반대로 하류 측 누설유동의 영향은 감소하게 된다. 이러한 특성은 Fig. 13에서 명확하게 나타난다.

Position-1과 Position-2의 경우, 다른 경우들에 비해 블레이드의 상대위치 변화에 따른 영향이 가장 크게 나타난다. 이것은 앞서 언급한 바와 같이 베인 후연과 블레이드 전연 사이의 간격이 다른 경우들에 비해 좁고 이로 인해 유속 및 난류강도 분포가 크게

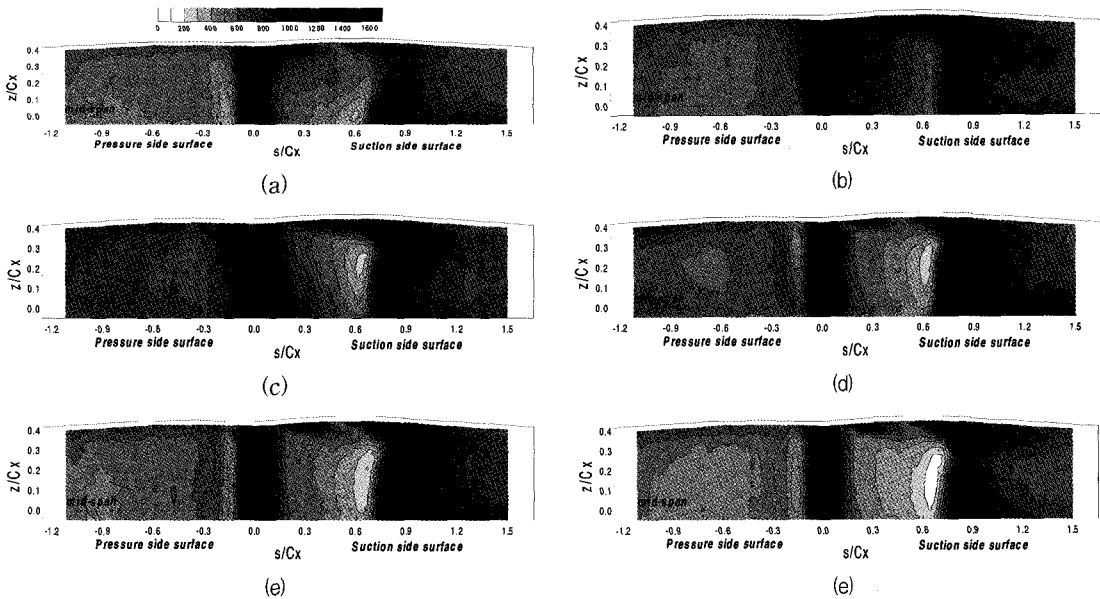


Fig. 11 Contour plots of ShC on the blade surface for various blade positions at $ReC=1.5 \times 10^5$: (a) Position-0, (b) Position-1, (c) Position-2, (d) Position-3, (e) Position-4 and (e) Position-5

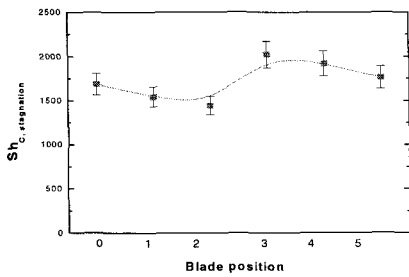


Fig. 12 Sh_c on the leading edge point at the mid-span (at $z/C_x=0.0$ and $s/C_x=0.0$) for various blade positions at $ReC=1.5 \times 10^5$

변화하기 때문이다. 특히, 블레이드 전연 주위로 유입되는 유동의 난류강도가 다른 경우들에 비해 매우 높기 ($T \gg 30\%$) 때문에 전연 부근 압력면에서의 열전달 특성이 크게 변화한다. 따라서 정체점은 전연에서 흡입면 측으로 치우쳐서 나타나며, 압력면에서는 박리기포의 영향이 소멸되고 전체적으로 열/물질전달이 증가하는 것으로 나타났다.

흡입면 측에서는 층류경계층 영역에서의 열/물질전달이 증가한다. 또한, 팁 인접영역에서는 흡입면 상류 측 누설유동의 영향이 감소하고 하류 측 누설유동의 영향이 증가하는 것으로 나타났다. 이것은 Fig. 5(b)에 제시된 바와 같이 블레이드로 유입되는 유동이 흡입면 상류 측으로 많이 유입되고, 이로 인해 블레이드

전연부근 누설유동의 절대 유량이 감소하기 때문인 것으로 생각된다. 하지만, 흡입면 미드스팬 부근 영역에서 유동 천이영역의 위치는 $s/C_x \cong 0.8$ 로 발생위치가 다른 경우와 거의 동일한 것으로 나타났다.

Position-3의 경우 베인에서의 후류가 전연면에 직접 영향을 미치기 때문에 다른 경우에 비해 전연면에서의 열/물질전달계수가 높은 것으로 나타났다. 블레이드의 상대위치가 Position-4, 5인 경우, 유입유동 분포가 균일해지기 때문에 흡입면 팁 인접부에서 상류 측 누설유동의 영향을 받는 영역 (VI-1)이 증가하고 앞서 설명했던 열/물질전달 특성이 명확하게 구분된다.

Fig. 12는 블레이드의 상대위치 변화에 따른 미드스팬 전연 ($z/C_x=0.0$, $s/C_x=0.0$)에서의 물질전달계수를 나타낸 그림이다. Position-0는 Position-5와 거의 동일한 물질전달계수를 갖는 반면, Position-1과 2는 정체점이 흡입면 측으로 치우치기 때문에 전연에서의 값이 상대적으로 낮게 나타났다. Position-3과 4는 베인 후연에서의 후류 영향으로 인해 Position-5의 경우에 비해 약 10~15% 높은 물질전달계수를 갖는 것으로 나타났다.

Fig. 13은 블레이드 미드스팬에서의 국소 열/물질전달계수 분포를 나타내는 그림이다. 앞서 Fig. 11에서 설명한 바와 같이, Position-1과 Position-2의 경우, 압력면에서 전체적으로 높은 물질전달계수를 가지며,

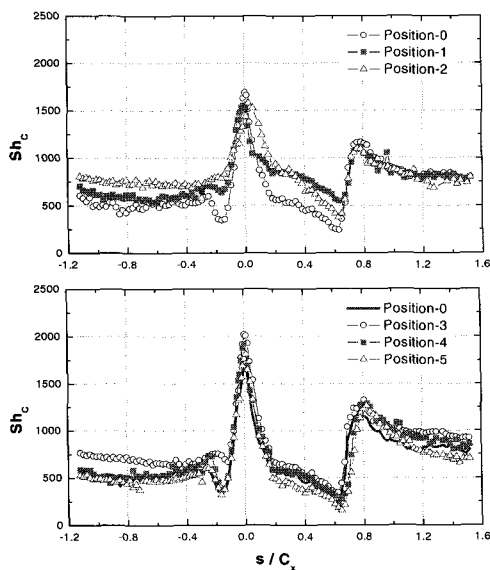


Fig. 13 Local distributions of Sh_c at the mid-span ($z/C_x=0.0$) for various positions at $ReC=1.5 \times 10^5$

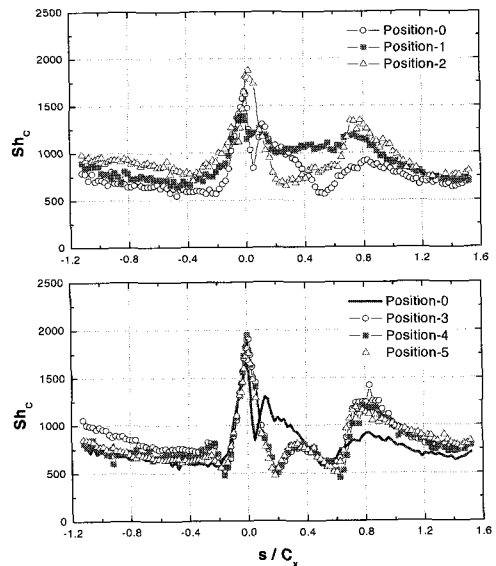


Fig. 14 Local distributions of Sh_c at $z/C_x=0.4$ for various positions at $ReC=1.5 \times 10^5$

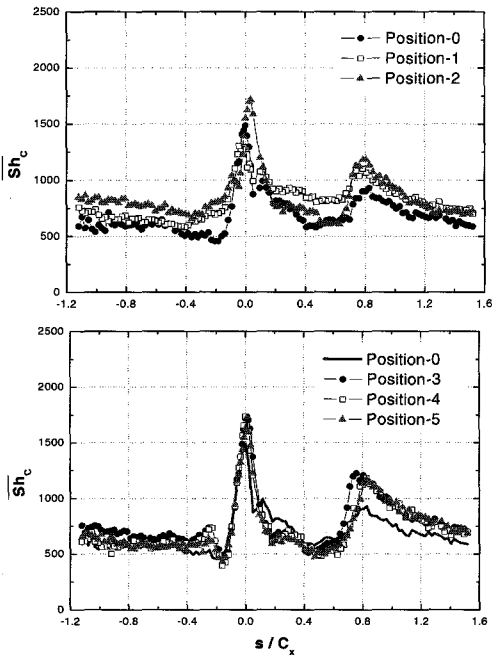


Fig. 15 Spanwise averaged ShC for various blade positions at $ReC=1.5 \times 10^5$

박리기포의 영향이 소멸되는 것을 확인할 수 있다. 또한, Position-2의 경우, 최대값을 갖는 정체점이 흡입면 측으로 약간 이동하며, 흡입면 층류경계층 영역의 열/물질전달계수가 Position-0에 비해 최대 50% 이상 증가하는 것을 알 수 있다. 하지만, 유동 천이 이후 다시 난류경계층이 발달하기 때문에 하류에서의 값은 다른 경우와 거의 동일한 것으로 나타났다.

Position-3의 경우는 베인 후류의 영향으로 전연부, 압력면, 흡입면에서 층류경계층 영역에서는 다른 경우들에 비해 높은 열/물질전달계수를 갖는 것으로 나타났다. 하지만 Position-4, 5의 경우, 균일한 유입 유동장이 형성되기 때문에 흡입면 상류영역을 제외하고 거의 전 영역에서 동일한 분포를 갖는 것을 알 수 있다.

Fig. 14는 블레이드 팁 인접 영역인 $z/C_x=0.4$ 에서의 국소 열/물질전달계수 분포를 나타내는 그림이다. 압력면의 경우, 상대위치 변화에 따른 물질전달계수 분포의 변화는 크지 않지만, 국소적으로 박리기포의 소멸, 유입유동의 난류강도 변화 등으로 열전달계수 분포가 최대 약 25% 내에서 변화하는 것으로 나타났다. 하지만, 흡입면에서의 열전달특성은 상대위치 변화에 따라 큰 영향을 받게 된다.

Position-0의 경우, 흡입면에서 전연부근 영역 ($s/C_x < 0.5$)에서는 상대적으로 높은 값을 갖는 반면, 하류에서 낮은 물질전달계수 분포를 보인다. 이것은 앞서 설명한 바와 같이 팁 누설유동의 거동에 따른 영향으로 생각된다. 하지만, Position-2로 진행하면서 점차 상류 측의 값은 감소하며, Position-3, 4, 5에서는 상류 측 극대 값이 하류 측 극대 값의 약 60% 정도이며, 위치 변화에 관계없이 거의 동일한 값을 갖는 것으로 나타났다. 따라서 상대적으로 균일한 유동이 유입되는 경우 누설유동이 흡입면에서의 열전달 특성에 미치는 영향은 거의 동일한 것을 알 수 있다.

이와 같이, 블레이드의 상대위치 변화에 따라 압력면 및 흡입면에서의 국소 열/물질전달계수가 변화하기 때문에 실제 블레이드가 회전을 하는 경우, 상대적으로 큰 열부하를 주기적으로 받게 될 것으로 생각된다.

스팬방향 평균 물질전달계수 분포를 살펴보면 (Fig. 15), 유입유동이 가장 영향을 많이 받은 Position-1과 Position-2의 경우를 제외하면 큰 차이는 없는 것으로 나타났다. 하지만, 이러한 스펜방향 평균 분포에서는 블레이드 팁 인접영역과 같이 열전달계수 분포가 불균일한 영역에 대한 정보를 정확히 알 수 없기 때문에 보다 자세한 열전달 특성 고찰을 위해서는 국소 열/물질전달계수 분포에 대한 정보가 필수적이다.

5. 결론

본 연구에서는 저속 환경 익렬 내에 고정된 터빈 블레이드에 대해서 베인과 블레이드 사이의 상대위치 변화에 따른 터빈 블레이드 표면에서의 국소 물질전달 특성을 고찰하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

- 1) 블레이드로 균일 유동장이 유입되는 경우, 블레이드 전연면에서는 정체점이 형성되면서 최대 열/물질전달계수를 갖고, 압력면에서는 박리기포가 형성된 뒤 유동이 재층류화되기 때문에 전체적으로 균일한 열/물질전달계수 분포를 갖는 것으로 나타났다. 흡입면에서는 유동 가속, 난류로의 천이 현상, 두 개의 누설와류 형성 등으로 인해 복잡한 열전달 특성을 갖는다.
- 2) 베인에 대한 블레이드의 상대 위치가 변하는 경우, 베인 출구 조건 및 면적의 변화를 가져오기 때문에 블레이드로 유입되는 유동의 유속분포 및 난류강도 분포가 변화하게 된다. 특히, Position-2의 경우 블레이드의 전연과 베인의

후연 사이의 거리가 가까기 때문에 다른 경우에 비해 유동 방해효과가 크며, 그 결과 전연면 부근에서는 평균 유속의 약 50% 정도인 유속분포를 가지며, 난류강도는 30% 이상인 것으로 나타났다.

- 3) 블레이드 전연 영역에서의 열전달계수는 블레이드 상대위치 변화에 따라 최대 15%까지 변화하는 것으로 나타났다. 특히, Position-3의 경우 상류 베인에서의 후류로 인해 다른 경우들에 비해 높은 값을 가지며, Position-2의 경우 유동 방해 효과로 인해 정체점이 흡입면 측으로 치우쳐서 나타났다.
- 4) 블레이드 압력면 미드스팬영역에서는 Position-1과 Position-2의 경우 유입유동의 난류강도가 크기 때문에 박리기포에 의한 영향이 나타나지 않고, 전체적으로 높은 열전달 계수를 갖는 것으로 나타났다. Position-3의 경우는 상류 베인 후류의 영향으로 상대적으로 높은 열전달계수를 갖는 것으로 나타났다. 하지만, 나머지 경우들은 거의 유사한 열전달 계수 분포를 갖는 것으로 나타났다.
- 5) 흡입면 미드스팬 영역에서의 열전달 특성은 상대위치 변화에 관계없이 거의 동일하지만, Position-1과 2의 경우, 유입유동의 난류강도가 높기 때문에 층류경계층 영역에서 상대적으로 높은 열/물질전달계수를 갖는 것으로 나타났다.
- 6) 블레이드 팁 인접영역의 경우, 블레이드 위치 변화에 따라 누설와류의 거동이 크게 변화하기 때문에 흡입면에서의 국소 열/물질전달계수 분포도 큰 영향을 받는다. Position-1인 경우 하류 측 누설와류에 의한 영향이 제일 큰 것으로 나타났으며, 이후 Position-5로 이동하면서 그 영향이 점차 감소하고, 상류 측 누설와류의 영향이 커지는 것으로 나타났다. 이와 같이, 블레이드 상대위치 변화에 따라 누설와류의 영향이 변화하기 때문에 실제 회전하는 블레이드 팁은 주기적인 열부하에 노출될 것으로 예상된다.

후 기

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

참고문헌

- (1) Chen, P. H. and Goldstein, R. J., 1992, "Convective Transport Phenomena on the Suction Surface of a Turbine Blade Including the Influence of Secondary Flows Near the Endwall," J. of Turbomachinery, Vol. 114, pp. 776~787.
- (2) Goldstein, R. J., Wang, H. P. and Jabbari, M. Y., 1994, "The Influence of Secondary Flows near the Endwall and Boundary Layer Disturbance on Convective Transport from a Turbine Blade," ASME Paper No. 94~GT-165.
- (3) Han, J. C., Zhang, L. and Ou, S., 1993, "Influence of Unsteady Wake on Heat Transfer Coefficient From a Gas Turbine Blade," J. of Heat Transfer, Vol. 115, pp. 904~911.
- (4) Arts, T., Duboue, J.-M. and Rollin, G., 1998, "Aerothermal Performance Measurements and Analysis of a Two-dimensional High Turning Rotor Blade," J. of Turbomachinery, Vol. 120, pp. 494~499.
- (5) Blair, M. F., 1994, "An Experimental Study of Heat Transfer in a Large-scale Turbine Rotor Passage," J. of Turbomachinery, Vol. 116, pp. 1~13.
- (6) Giel, P. W., Boyle, R. J. and Bunker, R., 2004, "Measurements and Predictions of Heat Transfer on Rotor Blades in a Transonic Turbine Cascade," J. of Turbomachinery, Vol. 126, pp. 122~129.
- (7) Chen, P. H. and Goldstein, R. J., 1992, "Convective Transport Phenomena on the Suction Surface of a Turbine Blade Including the Influence of Secondary Flows near the Endwall," J. of Turbomachinery, Vol. 114, pp. 776~787.
- (8) Goldstein, R. J., Wang, H. P. and Jabbari, M. Y., 1994, "The Influence of Secondary Flows Near the Endwall and Boundary Layer Disturbance on Convective Transport from

- a Turbine Blade," ASME Paper No. 94-GT-165.
- (9) Hermanson, K., Kern, S., Picker, G. and Parneix, S., 2002, "Predictions of External Heat Transfer for Turbine Vanes and Blades With Secondary Flowfields," J. of Turbomachinery, Vol. 125, pp. 107~113.
- (10) 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," J. of Heat Transfer, Vol. 125, pp. 669~677.
- (11) Jin, P. and Goldstein, R. J., "Local Mass/Heat Transfer on Turbine Blade Near-Tip Surface," ASME Paper No. GT-2002-30556.
- (12) 권현구, 이상우, 박병규, 2002, "큰 회전각을 가지는 터빈 블레이드 표면에서 나프탈렌 승화법을 이용한 열(물질)전달계수 측정," 대한기계학회 논문집B, 제26권, 제6호, pp. 1077~1087.
- (13) 이상우, 권현구, 2004, "회전각이 큰 터빈 동익 누설유동 영역에서의 열(물질)전달 특성," 대한기계학회 논문집B, 제28권, 제5호, pp. 535~544.
- (14) 이동호, 조형희, 2005, "환형 캐스케이드 내 고정된 터빈 블레이드 및 슈라우드에서의 열/물질전달 특성 (I) - 블레이드 끝단 인접 표면," 대한기계학회 논문집B, 제29권, 제4호, pp. 485~494.
- (15) 이동호, 조형희, 2005, "환형 캐스케이드 내 고정된 터빈 블레이드 및 슈라우드에서의 열/물질전달 특성 (II) - 끝단 및 슈라우드," 대한기계학회 논문집B, 제29권, 제4호, pp. 495~503.
- (16) 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.
- (17) Kline, S. J. and McClintock, F., 1953, "Describing uncertainty in single sample experiments," Mechanical Engineering, Vol. 75, pp. 3~8.
- (18) 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.