

# 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\*, Hyung Hee Cho\*\*

*Key Words* : Turbine Blade(터빈 블레이드), Blade Surface(블레이드 표면), Relative Position(상대위치), Heat/Mass Transfer(열/물질전달), Tip Leakage Flow(팁 누설유동), Naphthalene Sublimation Method(나프탈렌 승화법)

### ABSTRACT

In this study, the effect of relative position of the blade for the fixed vane has been investigated on blade surface heat transfer. The experiments were conducted in a low speed stationary annular cascade, and heat transfer of blade was examined for six positions within a pitch. Turbine test section has one stage composed of sixteen guide vanes and blades. The chord length of the tested blade is 150 mm and the mean tip clearance of the blade having flat tip is about 2.5% of the blade chord. For the detailed mass transfer measurements on the blade surfaces, a naphthalene sublimation technique was used. The inlet flow Reynolds number is fixed to  $1.5 \times 10^5$ . Complex heat transfer characteristics are observed on the blade surface due to various flow characteristics, such as separation bubble, relaminarization, transition to turbulence and leakage vortices. The distributions of velocity and turbulence intensity change significantly with the relative position due to the blockage effect of the blade. This causes the variation of heat transfer patterns on the blade surface. The results show that the flow near the leading edge get highly disturbed and deflected toward the either side of the blade when the blade leading edge is positioned close to the trailing edge of the vane. Therefore, separation bubble disappears on the pressure side and overall heat transfer on the relaminarization region is increased. But, due to reduced tip gap flow at the upstream region, the effect of leakage flow on the upstream region of the blade surface is weakened. Thus, the heat transfer characteristics significantly change with the blade positions.

### 1. 서론

가스터빈엔진의 경우 성능향상을 위하여 지속적으로 터빈입구온도가 증가되어 왔으며, 이로 인해 연소실과 터빈과 같이 가스터빈엔진의 고온부에 걸리는 열

---

\* 연세대학교 기계공학과  
\*\* 연세대학교 기계공학과  
E-mail : rhee@yonsei.ac.kr

부하 또한 계속 증가하는 추세이다. 이 중 터빈 블레이드는 연소실, 베인(vane)과 함께 열부하가 크게 걸리는 대표적인 요소 중 하나이다. 특히, 터빈 블레이드는 고온의 환경에서 고속으로 회전하는 등 매우 열악한 환경에서 작동하며 블레이드 끝단과 슈라우드 사이의 간극(tip clearance)을 통한 누설유동(leakage flow)의 영향으로 매우 불균일하고 높은 열부하를 받는다.

이와 같은 터빈 블레이드의 수명 예측 및 내구성 향상을 위해서는 다양한 냉각방식의 연구개발 및 적용과 더불어 여러 조건에 대한 블레이드 온도 및 열응력 해석(thermal stress analysis)이 필요하다. 이러한 열적 해석을 위해서는 요소 표면에서의 열전달 계수분포 등 국소 열전달 특성을 고찰하는 것이 필수적이며, 이러한 자료를 통해서 차후에 열적으로 취약한 부분에 대한 설계 및 냉각성능 개선이 이루어질 수 있다.

이에 본 연구에서는 터빈 블레이드 표면에 대한 국소 열전달 특성을 고찰하였으며, 특히 미드스팬(mid-span)에서부터 3차원의 복잡한 유동장이 형성되는 블레이드 끝단면 인접영역(near-tip region)에 대한 열전달 특성을 고찰하였다.

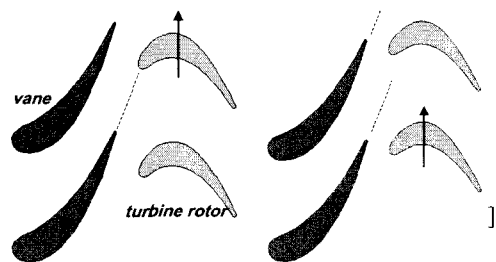
블레이드 미드스팬(mid-span), 즉 2차원적인 유동특성을 갖는 영역 및 바닥면(endwall) 부근에서의 열전달 특성에 대한 연구는 과거부터 많이 이루어져 왔다.<sup>(1-9)</sup> 하지만, 블레이드 끝단면 인접영역의 경우 간극을 통한 누설유동으로 인해 큰 열부하를 받고 열전달 특성 또한 매우 복잡하게 나타나기 때문에 최근에는 블레이드 끝단면 인접부를 포함한 영역에서의 열전달 특성에 대한 연구가 이루어지고 있다.

Kwak and Han<sup>(10)</sup>은 감온성 액정(TLCs)을 이용하여 블레이드 끝단과 블레이드 표면, 슈라우드(shroud)에서의 국소적인 열전달 계수를 측정하여 블레이드 끝단 인접부에서 누설유동이 블레이드 및 슈라우드에서의 열전달에 미치는 영향을 고찰하였다. Jin and Goldstein<sup>(11)</sup>은 나프탈렌 승화법을 이용하여 블레이드 끝단 및 끝단 인접부 블레이드 표면에서의 국소 열전달 특성을 고찰하였으며, 통로와류(passage vortex) 및 누설와류(leakage vortex)의 영향에 대하여 고찰하였다. Kwon et al.<sup>(12)</sup>은 블레이드 끝단 간극이 존재하는 경우 끝단 인접부 블레이드 표면에서의 국소 열전달 특성을 고찰하였다. Rhee and Cho<sup>(13)</sup>는 환형 캐스케이드 내 고정된 블레이드에 대하여 블레이드 표면, 끝단면, 슈라우드에서의 국소 열전달 특성을 동시에 고찰하여 블레이드 및 슈라우드에서의 열전달에 대한 누설

유동의 영향에 대하여 연구하였다. 그 결과 블레이드 표면에서는 매우 복잡한 열전달 특성을 가지며, 특히 흡입면 측에서 두 개의 누설와류가 발달하여 블레이드 표면 및 슈라우드 표면의 열전달에 영향을 끼치는 것을 밝혀냈다.

지금까지의 연구들은 주로 균일한 유동장이 블레이드에 유입되는 경우에 대하여 수행되어 왔으나, 실제의 경우 블레이드는 상류에서의 유동 조건에 의해 영향을 받게 된다. 블레이드 주위에서의 유동 및 열전달 특성에 영향을 주는 인자로는 베인 후연(trailing edge)에서 발생하는 후류(wake), 끝단부에서의 와류, 비정상성 난류, 베인과 블레이드의 상대 위치 변화에 따른 주기적 맥동현상 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 이와 같이 블레이드의 열전달 특성에 영향을 줄 수 있는 여러 가지 인자 중에서 베인과 블레이드의 상대 위치 변화로 인해 발생하는 유입 유동의 조건 변화가 블레이드 표면의 열전달에 미치는 영향에 대하여 고찰하였다. 이를 위해 환형 터빈 캐스케이드(annular turbine cascade)에서 상류 베인에 대한 블레이드의 상대적 위치를 변화시켜가면서 그에 따른 블레이드의 표면에서의 국소 열/물질전달 특성을 고찰하였다. 상대적인 위치변화에 따른 열전달 특성을 보다 정확히 고찰하기 위하여 정해진 위치에 블레이드를 고정시키고 각각의 고정된 위치에 대하여 블레이드 표면에서의 열전달 특성을 고찰하였다. 국소 열/물질전달계수를 측정하기 위해 물질전달실험방법 중의 하나인 나프탈렌 승화법을 이용하여 실험을 수행하였다.



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

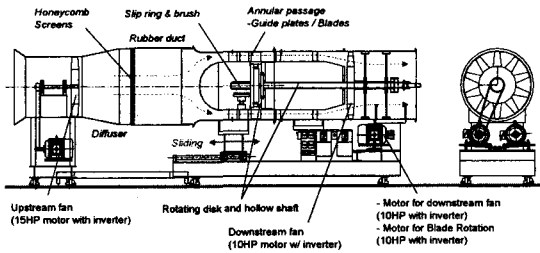


Fig. 2 Schematic view of experimental apparatus

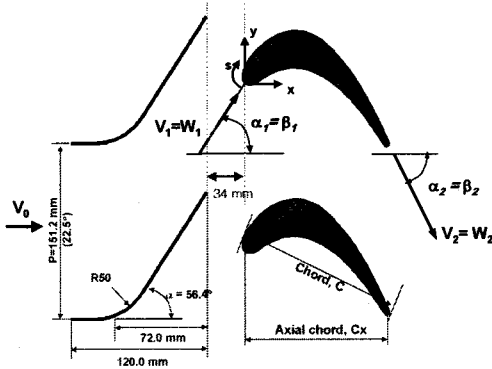


Fig. 3 Schematic view of guide vane and blade

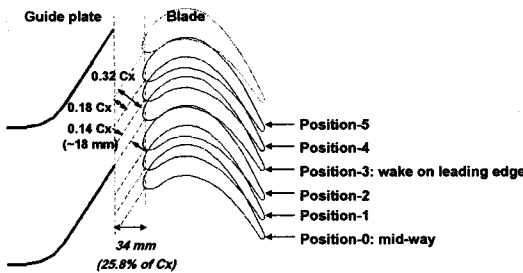


Fig. 4 Relative positions between guide plate and blade for stationary cases

## 2. 실험 장치 및 방법

### 2.1 실험 장치

Fig. 2는 본 실험에 사용된 실험장치의 개략도를 나타내는 그림이다. 본 실험에는 환형 터빈캐스케이드가 장착된 저속 풍동이 사용되었으며, 크게 상류 측 팬(fan), 1단(one stage) 터빈 시험부, 하류 측 흡입팬 등 세 부분으로 나누어진다. 본 실험에서는 상류 측 팬만을 이용하여 유동을 발생시켰다. 상류 팬을 통해 유입된 유동은 정체실(plenum chamber)을 지나 환형 유로로 유입되고, 이후 시험부, 즉 베인과 블레이드를 지난

후 하류 측 팬을 통해 외부로 배출된다. 정체실은 직경 1,000 mm의 고무관으로 제작되었으며, 유동의 안정화를 위하여 내부에 허니콤(honeycomb)과 고운 망(screen)을 설치하였다.

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 회전이 가능한 디스크에 고정되어 있다. 상대위치 변화 효과를 보기 위해서 디스크를 회전시켜 베인에 대한 블레이드의 상대위치를 변화시키고 디스크를 고정된 다음 실험을 수행하였다. 블레이드의 상대위치에 대한 자세한 내용은 다음 장에 제시되어 있다.

앞서 언급한 바와 같이 본 실험에서는 나프탈렌 승화법을 이용하여 블레이드 표면에서의 국소 물질전달 계수를 측정하였다. 이를 위해 블레이드 시편은 알루미늄으로 제작하였으며, 표면은 끝단에서 미드스팬 아래쪽 15 mm 까지 나프탈렌이 코팅되도록 설계하였다. 블레이드 시편의 자세한 사양은 Rhee and Cho<sup>(13)</sup>에 제시되어 있다. 시험시편을 제외한 나머지 15개의 블레이드는 주조를 통해 알루미늄으로 제작, 설치하였다.

블레이드 표면에서의 압력분포 특성을 관찰하기 위하여 나프탈렌 코팅된 블레이드 시편 좌우의 블레이드 미드스팬 표면에 정압 탭(static pressure tap)을 설치하여 실험 중 미드스팬에서의 정압을 측정하였다.

베인 입구에서의 유속을 측정하기 위해 환형 유로 내 베인의 상류에 두 개의 피토투브(pitot tube)를 설치하였으며, 총 6개의 J-type 열전대를 환형 유로에 설치하여 실험 중 유입유동의 온도를 측정하였다. 또한, 블레이드 표면에서의 온도 및 압력측정 결과를 획득하기 위해 Fig. 2에서와 같이 20채널 슬립링(slip ring)을 블레이드를 고정시키는 디스크에 설치하였다.

### 2.2 베인 및 터빈 블레이드

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

베인은 후연(trailing edge)에서의 후류(wake) 발생 효과를 최소화하기 위하여 두께 약 1.3 mm의 얇은 철판으로 제작하였으며, 입구각도는 0, 출구각도는 56.4로 블레이드 입구각도와 같도록 하였다.

터빈 블레이드는 GE 7FA 1단 블레이드의 미드스팬

Table 1 Blade configuration

Number of blades	16	
Chord length (C)	150 mm	
Axial chord (C <sub>x</sub> )	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)	
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%)	

Table 2 Operating conditions

Inlet flow velocity (V <sub>0</sub> ) / mean Tu	8.3 m/s / ~9%
Vane exit angle	56.4°
Mean vane exit flow velocity (V <sub>1</sub> )*	15 m/s
Mean blade inlet velocity (W <sub>1</sub> ) / Tu	15 m/s / ~3%
Mean blade exit velocity (W <sub>2</sub> )*	18 m/s
Rec	$1.5 \times 10^5$
Rec <sub>exit</sub>	$1.8 \times 10^5$

형상을 기준으로 제작하였으며, 코드길이(chord length)는 150 mm, 미드스팬 기준 블레이드 사이 간격은 1.01C이다. 환형 유로를 따라 총 16개의 블레이드가 설치되어 있으며, 베인과의 간격은 34 mm (0.227C)이다. 블레이드의 끝단은 평면이며, 압력면 측으로 3.8 기울어진 끝단 형상을 갖는다. 따라서, 팁 간극은 축 방향을 따라가면서 간극은 약 2 mm에서 6 mm까지 변화하게 되며, 압력면 측이 흡입면 측에 비해 상대적으로 큰 간극을 갖는다. 평균 간극은 약 3.8 mm로 코드길이 대비 약 2.5%이다. 블레이드 형상에 대한 자세한 정보는 Table 1에 제시되어 있다.

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. 여기서 Position-0은 블레이드의 전연(leading edge)이 베인과 베인 사이 정 중앙(mid-way)에 위치하는 것을 의미하며, Position-1과 Position-2는 y>0방향으로 각각의 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>0방향으로 각각 3.4°, 6.8° 회전한 위치를 나타낸다.

## 2.3 유동 및 압력 측정

블레이드 표면에서의 정압 측정을 위해 FCO-44 차동 압력 변환기(differential pressure transducer, 250 mmH<sub>2</sub>O, Dwyer, Inc.)를 디스크 내부에 설치하였다. 베인 출구 하류에서의 유동의 유속 및 난류강도를 측정하기 위하여 IFA-300 열선 유속계(Hot-wire anemometry)와 I-형 프로브(probe)를 이용하였으며, 검출률(sampling rate)을 4,000Hz로 하여 총12,288개의 데이터를 획득, 평균하여 사용하였다.

## 2.4 실험 조건

본 실험에 사용된 풍동에서는 베인 입구에서 완전 발달된 난류경계층이 형성되며, 이 때 경계층의 두께는 약 15 mm이고 주유동의 난류강도는 약 9%이다. 이후 유동은 상류 베인을 지나면서 가속된다. 베인 출구에서의 유동은 블레이드의 위치에 따라 영향을 받으며, 블레이드가 설치되지 않은 경우, 베인 출구 하류 10 mm지점에서의 경계층 두께는 5 mm, 난류강도는 약 3%이다. 입구 유동에 대한 자세한 측정결과는 Rhee and Cho<sup>(13)</sup>에 제시되어 있다.

본 실험은 블레이드 입구에서의 Re 수가 Rec=1.5×10<sup>5</sup>로 고정시키고 상류 베인에 대하여 블레이드의 상대위치를 변화시켜가며 실험을 수행하였다. 블레이드의 상대위치에 따른 유속 및 난류강도의 분포는 다음 장에 제시되어 있으며, 실험 중 블레이드 입구 Re수는 베인 입구에서 측정된 유속으로부터 계산하였다. 자세한 운전조건은 Table 2에 제시되어 있다.

## 3. 열/물질전달계수

### 3.1 물질전달계수

국소물질전달계수는 다음과 같이 정의된다.

$$h_m = \rho_s (dy / dt) / (\rho_{s,w} - \rho_{s,\infty}) \quad (1)$$

본 실험의 경우 유입유동은 나프탈렌을 거의 포함하고 있지 않기 때문에,  $\rho_{v,\infty}=0$ 으로 하였다

물질전달계수의 무차원수인 Sh 수는 다음과 같이 정의된다.

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

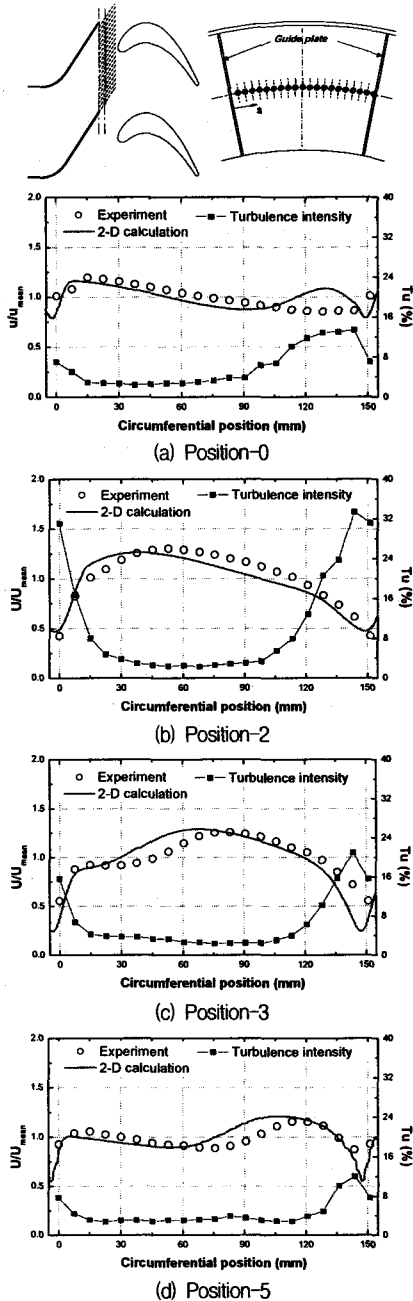


Fig. 5 Velocity distributions along the mid-span between the two adjacent vanes

여기서  $D_{naph}$ 는 Goldstein and Cho<sup>(14)</sup>에 의해 제시된 값을 이용하였다. 본 연구에서의 불확실성 해석은 Kline and McClintock<sup>(15)</sup>의 방법을 이용하여 이루어졌으며, 95%의 신뢰도에 대해서 약  $\pm 7.4\%$ 인 것으로 나

타났다.

물질전달계수는 열과 물질전달 사이의 유사성을 이용하여 열전달계수로 전환될 수 있으며, 본 실험의 경우 상온에서 수행되었기 때문에 본 실험결과로부터 다음과 같은 식으로 열전달계수의 무차원수인 Nu 수를 얻을 수 있다.

$$Nu / Sh = (Pr / Sc)^{0.4} \quad (3)$$

### 3.2 측정 장치 및 방법

블레이드 표면, 팁, 슈라우드 표면에서의 국소 물질 전달계수를 측정하기 위해서는 식 (1)에 제시된 바와 같이 나프탈렌 승화 깊이를 알아야 하며, 이는 실험 전과 후 시편표면의 나프탈렌 표면고도를 측정함으로써 얻을 수 있다. 본 연구에서는 블레이드 표면 등 측정하고자 하는 면이 곡면이기 때문에 3축의 직선이송 장치에 선형가변차동변환기(LVDT; linear variable differential transformer)를 연결하고 1축의 회전 장치에 시편을 장착하여 측정하였다. LVDT 및 4축 측정 장비의 자세한 사양은 Rhee<sup>(16)</sup>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 약 24 mm 상류지점에서의 유동의 속도 및 난류강도 분포를 나타내는 그림이다. 블레이드 유입유동은 4가지 블레이드 위치에 대해서 측정되었다. 여기서 실선은 2차원 형상에 대한 수치해석결과를 나타내며, 화살표는 측정 면에 대한 블레이드 전연의 위치를 나타낸다.

전체적으로 베인의 후연 하류에서는 후류의 영향으로 인해 유속은 평균 유속의 약 50~70% 정도의 크기를 갖고 평균 난류강도인 약 3%에 비해 높은 값을 갖는다. 또한, 베인의 출구 면적이 블레이드에 의해 좁아지기 때문에 블레이드의 전연 위치에 따라 유속 및 난류강도 분포가 달라지는 것을 알 수 있다.

Position-0의 경우, 블레이드의 전연을 기준으로  $y>0$  방향측은 베인의 후연부와 블레이드의 전연부가 가깝기 때문에 이 곳의 유로 면적이 상대적으로 감소하게 된다. 이렇게 되면, 유동은 저항이 상대적으로 적은 곳으로 쏠리는 현상이 발생하기 때문에 유로 면적이 큰 곳에서 상대적으로 유속이 높게 나타나는 반면,

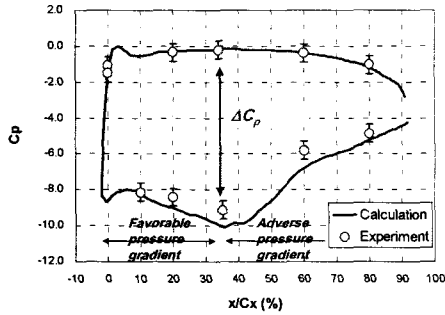


Fig. 6 Distribution of static pressure coefficients along the blade mid-span at Position-5

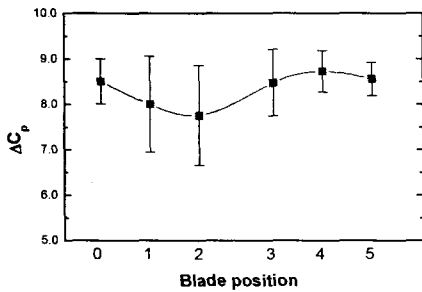


Fig. 7  $\Delta C_p$  distribution for various relative positions of blade

블레이드의 전연부와 후연부 인접영역에서는 유속이 낮고 난류강도가 높게 나타난다. 이와 같은 현상은 Position-2인 경우(Fig. 5(b)) 더욱 명확해진다. Position-2의 경우, 베인 후연과 블레이드의 전연에 의한 유동방해 효과(blockage effect)가 다른 경우들에 비해 매우 크기 때문에 블레이드 전연 상류에서의 유속은 평균유속의 약 50%인 것으로 나타났다. 이에 반해 난류강도는 약 30%까지 증가하여, 다른 영역에서의 값에 비해 최대 10배 이상 높은 것으로 나타났다.

Position-3과 Position-5의 경우도 위와 동일한 유동 분포 경향을 보이지만, 다른 경우에 비해 유속 및 난류강도 분포의 왜곡이 심하지 않은 것을 알 수 있다. 특히, Position-5인 경우가 제일 균일한 유동장이 형성되는 것으로 관찰되었으며, 기본적인 압력분포 및 열전달 특성은 블레이드를 Position-5에 위치시킨 후 고찰하였다.

앞서 언급한 바와 같이 블레이드 미드스팬 표면에서의 정압분포는 Position-5인 경우에 대하여 측정하였으며, Fig. 6은 이 때의 블레이드 표면에서의 정압계수 분포를 나타내는 그림이다. 여기서 실선은 3차원 수치해석 결과를 나타낸다. 정압계수는 다음과 같이 정의된다.

$$C_p = (P_s - P_0) / 0.5\rho V_0^2 \quad (4)$$

압력면 측은 전체적으로 균일한 분포를 보이는 반면, 흡입면 측에서는 상류 쪽에서 유동 가속과 함께 정압이 급격히 감소한 뒤 하류로 진행하면서 서서히 압력을 회복하는 역압력 구배를 갖는다. 따라서, 이 구간에서 유동의 재층류화 이후 난류로의 천이현상(transition to turbulent flow)이 발생하는 것을 예측할 수 있으며, 이러한 현상은 열전달 특성에서 확인할 수 있다. 또한, 압력면과 흡입면 간의 압력차는  $x/C_x=0.34$ 에서 최대값을 갖고, 이러한 압력차에 의해 블레이드 끝단에서 누설유동이 발생하게 된다. 수치해석의 결과를 살펴보면 전연 부근 압력면 표면에서 극소값이 나타나는 것을 볼 때, 이 영역에서 박리기포(separation bubble)가 형성되는 것으로 예측할 수 있다.

본 실험에서는 블레이드 주위 유동의 반복성 및 블레이드 상대위치 변화에 따른 유동특성을 간접적으로 파악하기 위해  $x/C_x=0.34$ 에서의 정압계수의 차( $\Delta C_p$ )를 측정하였으며, 그 결과가 Fig. 7에 제시되어 있다. 각각의 경우 약 300~400개의 측정결과를 평균하였으며, 오차막대는 측정결과에 대한  $2\sigma$ 의 크기를 나타낸다.

블레이드의 위치변화에 따라 최대 정압계수의 차가 정현파(sine wave)를 그리며 변화하는 것으로 나타났으며, Position-1과 Position-2의 경우 유동의 섭동성분이 매우 큰 것으로 나타났다. 반면에, 유속분포결과에서 언급했듯이, Position-5의 경우 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.

## 4.2 국소 열/물질전달 특성

### 4.2.1 블레이드 표면에서의 열전달 특성

Fig. 8(a)와 Fig. 9는 블레이드가 Position-5에 위치하는 경우 블레이드 표면에서의 국소 열/물질전달계수 분포를 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 현상으로 특징 지워지며, 이러한 유동특성에 영향을 받는 영역을 Fig. 8(b)에 표시하였다.

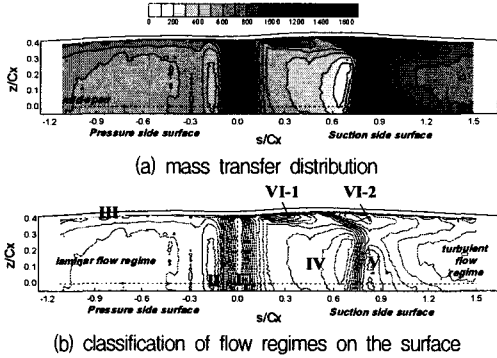


Fig. 8 Local heat/mass transfer characteristics on the blade surface for Position-5 at  $Re_c=1.5 \times 10^5$

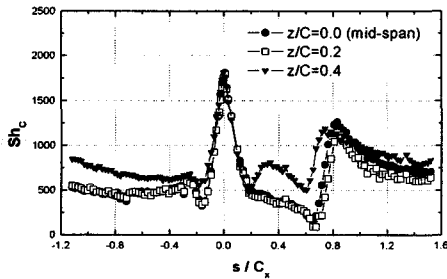


Fig. 9 Local distributions of  $Sh_c$  on blade surface for Position-5 at  $Re_c=1.5 \times 10^5$

- I. 전연 부근의 정체점(stagnation point)
- II. 압력면에서의 박리기포
- III. 압력면 끝단 부에서의 유동유입효과
- IV. 유동의 재층류화
- V. 유동의 천이
- VI. 흡입면 끝단 부에서의 누설유동

전연면에서는 유입되는 유동이 정체점(stagnation point)을 형성하기 때문에 매우 큰 열전달계수가 관찰된다. 압력면 표면에서는, 전연 부근에서 박리기포가 형성되어 국소적으로 낮은 열/물질전달 영역이 형성되고 이후 유동이 난류로 천이하면서 열/물질전달이 약간 증가하지만, 이후 다시 유동이 안정화되면서 재층류화 되기 때문에 거의 균일한 열/물질전달계수 분포를 갖는 것으로 나타났다. 팁 부근에서는 유동이 팁 간극 내로 유입되면서 가속되기 때문에 미드스팬 부근에서의 값에 비해 열/물질전달계수가 높은 것을 알 수 있다.

흡입면에서 미드스팬 부근( $z/C_x \leq 0.3$ )에서는 유동이 급격히 가속되기 때문에 재층류화되어 낮은 열/물질전

달계수를 갖지만, 이후 난류로의 천이가 발생하여  $s/C_x=0.8$  부근에서 극대값을 갖게 된다. 그 이후로는 난류경계층이 발달하면서 서서히 열/물질전달계수가 감소하는 분포를 갖는다.

흡입면 끝단 부근에서는 누설유동에 의해 열/물질전달이 증가되는데, 특히, 전연면 부근에서 작은 축진영역(VI-1, Fig. 8(b))이 형성된 후  $s/C_x=0.5$  부근부터 다시 하나의 축진영역(VI-2, Fig. 8(b))이 발생하기 시작한다. 이것은 흡입면 측으로 빠져 나오는 팁 간극 유동이 상류 측과 하류 측 두 갈래로 나누어지기 때문이다. 이러한 특성에 대한 자세한 설명은 Rhee and Cho<sup>(13)</sup>에 제시되어 있다. 이때 하류 측 누설유동에 의한 열/물질전달은 전연면에서의 약 70% 정도에 달하는 것으로 나타났으며, 이러한 결과로부터 흡입면 측 블레이드 팁 부근에서는 누설유동에 의해 상당히 큰 열부하를 받는다는 것을 알 수 있다.

#### 4.2.2 상대위치 변화에 따른 국소 열전달 특성

Fig. 10은 여러 가지 블레이드 상대위치에 대하여 블레이드 표면에서의 열/물질전달계수 분포를 나타내는 그림이다. 블레이드의 위치가 변화하더라도 앞서 설명했던 기본적인 열/물질전달 특성은 크게 달라지지 않는다. 하지만, 위치 변화에 따라 열/물질전달 축진영역의 범위 혹은 물질전달계수의 크기가 변화하게 된다.

Position-0의 경우(Fig. 10(a)), 전체적인 특징은 Position-5(Fig. 8 혹은 Fig. 10(f))의 경우와 동일하다. 예를 들어, 압력면 측에는 박리기포, 끝단 인접부의 유동가속 등으로 인한 특성이 관찰되었으며, 흡입면에서는 유동의 재층류화, 천이, 누설유동에 의한 특성이 동일하게 관찰되었다. 하지만 이 경우 흡입면 끝단 인접 영역에서 상류 측 누설유동의 영향이 상대적으로 큰 것으로 나타났는데, 이것은 유동의 유속분포에서 그 이유를 찾을 수 있다. Fig. 5(a)와 Fig. 5(d)를 비교해보면, Position-0의 경우 블레이드의 흡입면 측으로 유입되는 유동의 유속이 낮은 것을 알 수 있으며, 이것은 압력면 측에서 간극으로 유입되는 유동의 유량이 상대적으로 더 크다는 것을 의미한다. 따라서 흡입면의 상류 측으로 빠져 나오는 누설유동의 영향이 Position-5의 경우에 비해 증가하고 상대적으로 하류 측 누설유동의 영향이 감소하게 된다. 이러한 특성은 Fig. 13에서 명확하게 나타난다.

Position-1과 Position-2의 경우, 다른 경우들에 비해 위치 변화에 따른 영향이 가장 크게 나타난다.

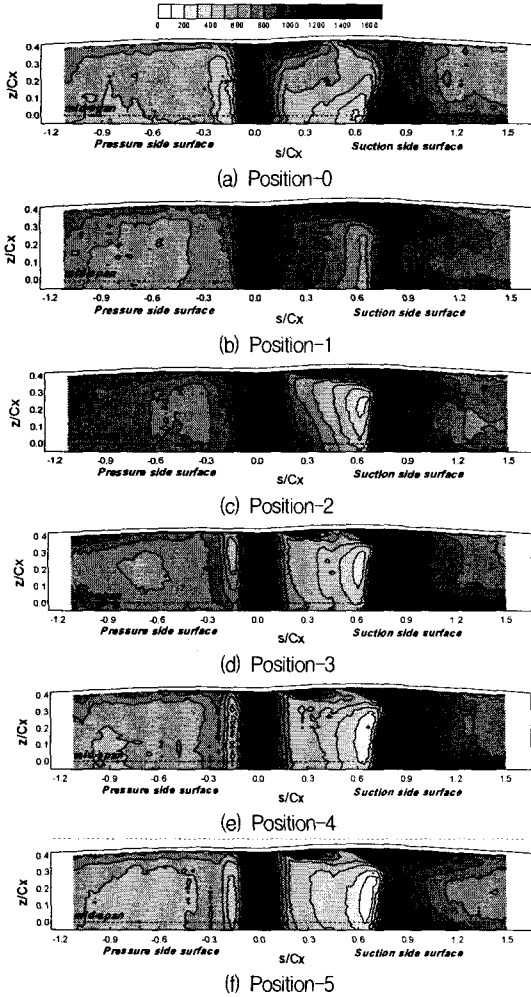


Fig. 10 Contour plots of  $Sh_c$  on the surface of the blade for various blade positions at  $Re_c=1.5 \times 10^6$

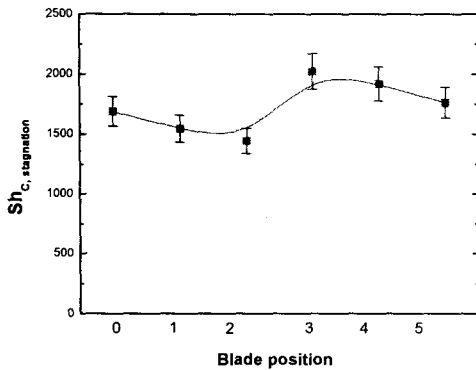


Fig. 11  $Sh_c$  on the leading edge point at the mid-span (at  $z/C_x=0.0$  and  $s/C_x=0.0$ ) for various blade positions at  $Re_c=1.5 \times 10^6$

이것은 베인과 블레이드에 의해 베인 후연 부근에서의 유동방해 효과가 매우 크고, 베인의 후연에서 발생한 후류가 블레이드 흡입면에 직접적으로 영향을 주며, 전연면 주위로 유입되는 유동의 난류강도가 다른 경우들에 비해 매우 높기 ( $Tu > 30\%$ ) 때문이다. 이러한 이유로 정체점은 흡입면 측으로 치우쳐서 나타나며, 압력면에서는 박리기포가 사라지고 전체적으로 열/물질 전달이 증가하는 것으로 나타났다. 흡입면 측에서는 재층류화 영역에서의 열/물질전달이 다소 증가한 것을 알 수 있다. 또한, 흡입면 끝단 인접영역에서의 열/물질전달계수 분포를 보면, 흡입면 상류 측 누설유동의 영향이 감소하고 하류 측 누설유동의 영향이 증가하는 것으로 나타났다. 이것은 Fig. 5(b)에 제시된 바와 같이 블레이드로 유입되는 유동이 블레이드에 의해 흡입면 상류 측으로 쏠려서 유입되기 때문에 블레이드 상류에서 압력면 쪽에서 간극 내로 유입되는 유동의 절대 유량이 감소하기 때문인 것으로 생각된다.

흡입면에서의 재층류화 현상 및 난류로의 천이에 의한 영향은 스펀 방향으로 극대값이 나타나는 위치는 차이가 있지만, 축방향으로는 발생위치가 거의 동일한 것으로 나타났다. 따라서, 비록 열/물질전달계수의 크기는 유동 조건에 의해 영향을 받지만, 축방향 위치는 블레이드 간격 등의 형상 조건에 의해 결정되는 것을 알 수 있다.

Position-3의 경우 베인의 후연에서의 후류가 전연면에 직접 영향을 미치지 때문에 다른 경우에 비해 전연면에서의 열/물질전달계수가 가장 높은 것으로 나타났으며, 이후 Position-5로 이동하면서 유입유동 분포가 균일해지기 때문에 흡입면 끝단 인접부에서 상류 측 누설유동의 영향을 받는 영역이 증가하고 Fig. 8에서 설명했던 열/물질전달 특성이 명확하게 구분되는 것을 알 수 있다.

Fig. 11은 미드스팬 전연 지점( $z/C_x=0.0$  and  $s/C_x=0.0$ )에서의 물질전달계수를 블레이드의 상대위치 변화에 따라 나타낸 그림이다. Position-0, 5는 거의 동일한 크기의 값을 갖는 반면, Position-1과 2는 정체점이 흡입면 측으로 치우치기 때문에 전연면에서의 값이 감소한다. Position-3과 4에서는 베인 후연에서의 후류 영향으로 인해 Position-5의 경우에 비해 약 10~15% 높은 물질전달계수를 갖는 것으로 나타났다.

Fig. 12는 미드스팬에서의 국소 열/물질전달계수 분포를 나타내는 그림이다. 앞서 Fig. 10에서 설명한 바와 같이, Position-1과 Position-2의 경우, 압력면에서



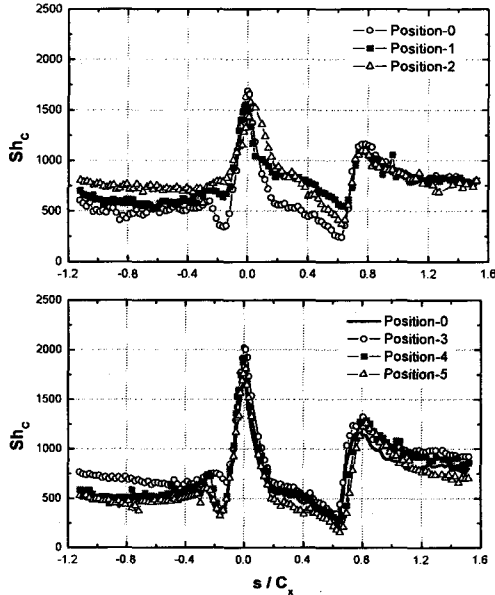


Fig. 12 Local distributions of  $Sh_c$  along the mid-span ( $z/C_x=0.0$ ) of blade for various positions at  $Re_c=1.5 \times 10^5$

전체적으로 높은 물질전달계수를 가지며, 박리기포와 관련된 극소값 분포가 소멸하는 것을 확인할 수 있다. 또한, 최대값을 갖는 정체점이 흡입면 측으로 약간 이동하며, 흡입면 측의 재층류화 영역에서 최대 50% 이상 물질전달이 증가하는 것을 알 수 있다. 하지만, 천이 이후 다시 난류경계층이 발달하기 때문에 그 이후에서의 값은 거의 동일한 것으로 나타났다.

Position-3의 경우는 배인 후연에서의 후류의 영향으로 전연부, 압력면, 흡입면에서 재층류화 영역에서 다른 경우들에 비해 높은 열/물질전달계수를 갖는 것으로 나타났다. 하지만 Position-4, 5의 경우 흡입면 상류영역을 제외하고 거의 전 영역에서 동일한 분포를 갖는다.

Fig. 13은 끝단 인접 영역인  $z/C_x=0.4$ 에서의 국소 열/물질전달계수 분포를 나타내는 그림이다.

Position-0의 경우 흡입면 상류 측( $s/C_x < 0.5$ )에서 상대적으로 높은 값을 갖고 하류에서 낮은 값을 갖는 분포를 보인다. 이것은 앞서 설명한 누설유동의 거동에 따른 영향으로 생각된다. 하지만, Position-2로 진행하면서 점차 상류 측의 값은 감소하며, Position-3, 4, 5에서는 누설유동에 의한 흡입면에서의 열전달 특성은 크게 변화하지 않는 것으로 나타났다. 압력면의 경우, 상대위치 변화에 따른 물질전달계수 분포의 변화는 크지

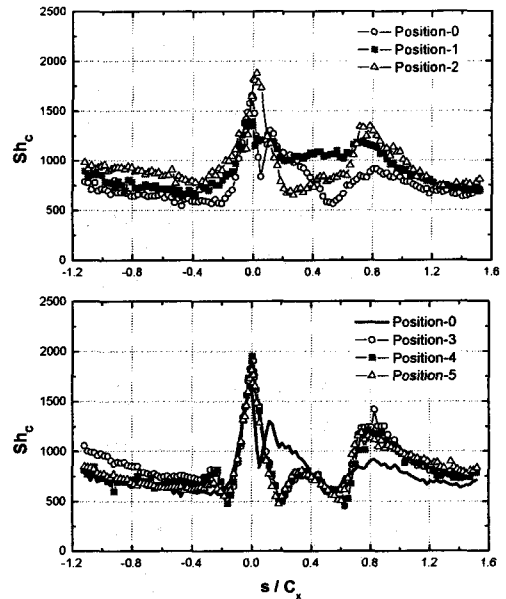


Fig. 13 Local distributions of  $Sh_c$  at  $z/C_x=0.4$  for various positions at  $Re_c=1.5 \times 10^5$

않지만, 국소적으로 박리기포의 소멸, 유입유동의 난류강도 변화 등으로 열전달 계수 분포가 최대 약 25% 내에서 변화하는 것으로 나타났다. 따라서, 실제 블레이드가 회전을 하는 경우, 블레이드 끝단 인접부에서는 배인과의 상대 위치 변화에 따라 상대적으로 큰 열부하를 주기적으로 받게 될 것으로 생각된다.

스팬방향 평균 물질전달계수 분포를 살펴보면(Fig. 14), 유입유동이 가장 영향을 많이 받은 Position-1과 Position-2의 경우를 제외하면 큰 차이는 없는 것으로 나타났다. 하지만, 이러한 스펜방향 평균 분포에서는 블레이드 끝단 인접영역과 같은 열전달계수의 변화가 심한 영역에 대한 정보를 정확히 알아낼 수 없기 때문에 보다 자세한 열전달 특성고찰을 위해서는 앞에서 제시한 것과 같은 국소 열/물질전달계수 분포에 대한 정보가 필수적이다

## 5. 결론

본 연구에서는 저속 환형 캐스케이드 내에 고정된 터빈 블레이드에 대해서 배인과 블레이드 사이의 상대 위치 변화에 따른 터빈 블레이드 표면에서의 국소 물질전달 특성을 고찰하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

(1) 배인에 대한 블레이드의 상대 위치가 변화하면 배인 출구 조건 및 면적의 변화를 가져오기 때문에

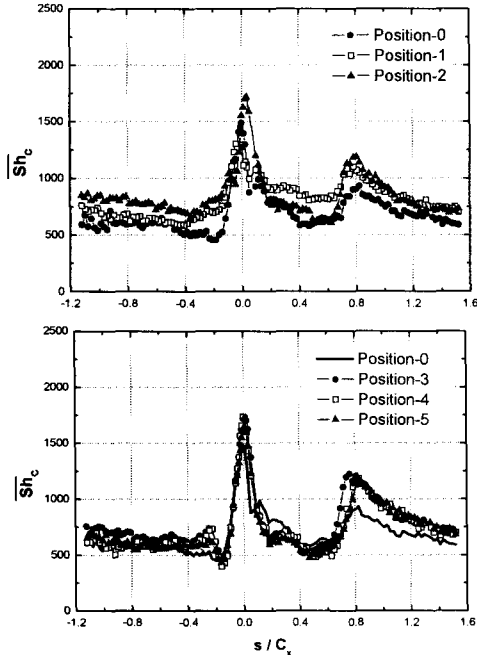


Fig. 14 Spanwise averaged  $Sh_c$  for various blade positions at  $Re_c=1.5 \times 10^5$

블레이드로 유입되는 유동의 유속분포 및 난류강도 분포가 변화한다. 일반적으로 블레이드의 전연이 위치하는 곳에서는 유동방해 효과가 크기 때문에 상대적으로 유속이 낮은 것으로 나타났다. 특히, 블레이드의 전연이 베인의 후연과 가까운 Position-2의 경우 유동의 방해효과가 크게 나타나서 전연면 부근에서의 유속은 평균 유속의 약 50% 정도이며, 난류강도는 30% 이상으로 유동조건이 크게 변화하였다.

(2) 블레이드 미드스팬 영역에서의 전체적인 열전달 특성은 블레이드의 위치가 변화하여도 크게 달라지지 않았다. 하지만, 블레이드 위치 변화에 따라 유속 분포가 달라지기 때문에 각각의 열전달 특성을 나타내는 영역의 크기 및 열전달계수의 크기가 변화하였다. 특히, Position-1과 Position-2의 경우 유입유동의 난류강도가 크기 때문에 압력면에서 박리기포가 소멸하였으며, 재층류화 영역에서도 높은 열/물질전달계수를 갖는 것으로 나타났다. Position-3의 경우는 베인 후연에서 발생한 후류가 블레이드의 전연에 직접 영향을 미치기 때문에 다른 경우들에 비해 15% 정도 높은 값을 갖는 것으로 관찰되었다.

(3) 블레이드 끝단 인접영역의 경우, 블레이드 위치 변화에 따라 누설와류의 거동이 크게 변화하기 때문에

국소 열/물질전달계수 분포도 급격한 변화하였다. 특히, Position-1과 Position-2의 경우, 압력면 측 간극으로 유입되는 유동이 하류 쪽으로 쏠리기 때문에 상류에서 발생하는 누설와류의 영향이 감소하고 하류 측에서의 누설와류의 영향이 증가하였다.

## 후 기

본 연구는 과학기술부 주관 국가지정연구소(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) Kwon, H. G., Lee, S. W. and Park, B. K., 2002, "Measurements of Heat (Mass) Transfer Coefficient on the Surface of a Turbine Blade with a High Turning Angle Using Naphthalene Sublimation Technique," *KSME Journal B*, Vol. 26, pp. 1077~1087.
- (13) Rhee, D. H. and Cho, H. H., 2004, "Heat/Mass Transfer Characteristics on Stationary Turbine Blade and Shroud in a Low Speed Annular Cascade (I) - Local Heat/Mass Transfer Characteristics," *KSME Journal B*, submitted.
- (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.