

< 논문 >

입사각이 터빈 동익 끝벽 열전달에 미치는 영향

박진재* · 이상우†

(2004년 11월 15일 접수, 2005년 5월 11일 심사완료)

Effect of Incidence Angle on the Endwall Heat Transfer Within a Turbine Rotor Passage

Jin Jae Park and Sang Woo Lee

Key Words: Incidence Angle(입사각), Heat Transfer(열전달), Turbine Endwall(터빈 끝벽), Naphthalene Sublimation Technique(나프탈렌승화법)

Abstract

The effect of incidence angle on the endwall heat (mass) transfer characteristics within a turbine rotor cascade passage has been investigated by employing the naphthalene sublimation technique. The experiments are carried out at the Reynolds number of 2.78×10^5 for two incidence angles of -5 and 5 deg. The result shows that the incidence angle has a considerable influence on the transport phenomena over the endwall. The positive incidence angle tends to promote development of the pressure-side leg of a leading-edge horseshoe vortex. The endwall thermal load is augmented by 7.5 percents at $i = -5$ deg but is reduced by 2.5 percents at $i = 5$ deg, in comparison with that at the design condition.

기호설명

- c : 코드(chord)
- b : 축방향 코드(axial chord)
- c_p : 공기의 정적비열
- D : 물질확산계수
- h : 열전달계수
- h_m : 물질전달계수
- i : 입사각, Fig. 2
- Pr : Prandtl 수 = ν/α
- Re : Reynolds 수 = $U_\infty c/\nu$
- Sc : Schmidt 수 = ν/D
- St : 열전달 Stanton 수 = $h/(\rho c_p U_\infty)$

- St_m : 물질전달 Stanton 수 = h_m/U_∞
- U_∞ : 자유유동 속도
- w : 익열 내부에서의 피치방향 폭, Fig. 2
- x, y, z : 익형 좌표계, Fig. 2
- y_p : 익열 내부에서의 피치방향 좌표, Fig. 2

그리스문자

- α : 공기의 열확산계수
- ν : 공기의 동점성계수
- ρ : 공기의 밀도

1. 서론

가스터빈 엔진의 효율을 향상시키기 위해서는 터빈 입구온도를 높여야 하며, 현재 터빈의 입구온도는 1500℃에 이르고 있다. 이와 같은 높은 입구온도 때문에 고온의 가스와 접하는 터빈의 여러 구성 요소에 대한 냉각이 필수적이며, 이들

† 책임저자, 회원, 금오공과대학교 기계공학부

E-mail : swlee@kumoh.ac.kr

TEL : (054)478-7296 FAX : (054)478-7319

* 금오공과대학교 대학원 기계공학과

고온 부품 표면에서의 정확한 열전달계수를 알아야 적절한 냉각시스템을 도입할 수 있다. 따라서 열전달계수는 터빈의 열시스템 설계에 있어서 매우 중요한 기초 데이터이다.

터빈의 끝벽(endwall)은 터빈 익형(blade) 표면과 마찬가지로 연소기로부터 흘러오는 고온의 연소 가스에 그대로 노출된다. 익형 끝벽 근처의 유동은 여러 종류의 와류(vortex)들로 구성되는 매우 복잡한 3차원 유동이다.⁽¹⁾ 이와 같은 3차원 유동은 끝벽에서의 열전달계수 분포에 큰 영향을 준다. Blair⁽²⁾는 막냉각되는 터빈 끝벽에서 막냉각효율과 열전달계수를 측정하였고, Graziani 등⁽³⁾은 열전대와 스트립 히터를 사용하여 익형 표면과 끝벽에서의 열전달에 대하여 연구하였다. York 등⁽⁴⁾은 고온 선형 익열(cascade) 풍동에서 열전대를 이용하여 끝벽에서의 열전달 특성을 연구하였다. Gaugler와 Russell⁽⁵⁾은 끝벽 근처 2차유동에 대한 가시화 결과와 측정된 열전달 분포를 비교하는 연구를 수행한 바 있다. Goldstein과 Spores⁽⁶⁾는 나프탈렌승화법을 이용하여 끝벽에서의 국소 열(물질)전달계수를 측정하였다. Lee 등⁽⁷⁾도 선회각(turning angle)이 큰 동익 끝벽에서 열전달계수를 측정하는 바 있다. 그러나 지금까지의 끝벽 열부하(thermal load) 측정 연구는 모두 입사각(incidence angle) i 가 0도인 설계점에서의 연구에 국한되어 있다.

본 연구에서는 탈설계점에서 선회각이 큰 가스 터빈 제 1 단 동익 끝벽에서 열전달계수의 분포를 측정하고자 한다. 이를 통해 입사각의 변화가

끝벽 열전달 특성에 미치는 영향을 규명할 예정이다.

2. 실험

2.1 실험장치

익열 풍동은 개방형 풍동, 입구덕트, 익열 등으로 구성된다(Fig. 1). 개방형 풍동은 면적축소비가 9.0이고, 최대 40m/s까지 유속의 변화가 가능하다. 입구덕트의 단면은 420mm×320mm이고, 유동 방향 길이는 1.2m이다. 이것의 입구 상하 벽에는 직경 2mm의 트립와이어와 사포가 차례로 부착되어 있어서, 상하 벽 근처의 유동이 난류 경계층으로 발달된다. Fig. 1에서 알 수 있듯이 익열에는 총 6개의 선형 터빈 익형이 설치되어 있다. 이것은 산업용 가스터빈의 터빈 제 1 단 동익의 미드스팬 형상을 근거로 large-scale로 제작되었다. 이 선형 익형의 중요 제원은 Fig. 2와 같다. 입사각은 Fig. 2에서와 같이 정의되며, 유동이 익형 입구각을 기준으로 압력면 쪽으로 유입되면 (+)이고 흡입면 쪽으로 치우치면 (-)이다. 본 연구에서는 입사각을 -5도와 5도로 변화시켰고, 이를 위해 Fig. 1과 같은 쉼기 형태의 평판을 익열 풍동 입구덕트와 익열 사이에 삽입시켰다. IBM PC로 계측 시스템을 온라인화하였으며, 이를 위해 다기능입출력보드(NI, AT-MIO-16D-H-9)가 컴퓨터에 내장되어 있다. 입구 자유유동의 난류강도를 측

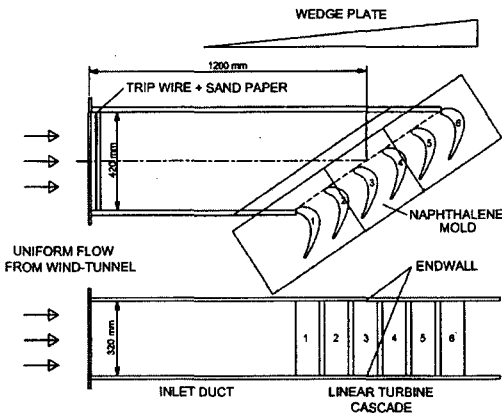
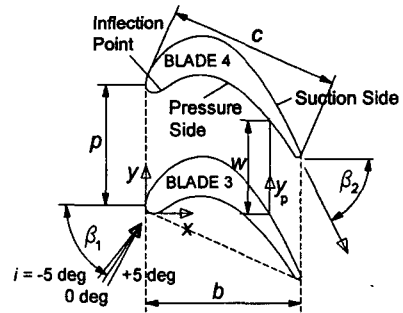


Fig. 1 Overall view of cascade wind tunnel at $i = 0$ deg



Number of blades	6
Chord length (c)	217.8 mm
Axial chord (b)	196.0 mm
Pitch (p)	151.6 mm
Span (s)	320.0 mm
Blade inlet angle (β_1)	56.4 deg
Blade outlet angle (β_2)	-62.6 deg

Fig. 2 Arrangement of turbine blade cascade

정하기 위해서 정온형 열선유속계(Kanomax, 1010)와 선형화기(Kanomax, 1013)를 사용하였다.

2.2 측정방법

열전달의 연구에 있어서 열전달과 물질전달의 유사성을 이용한 실험방법이 널리 이용되고 있다. 나프탈렌승화법은 그 중 한 방법으로 열전달계와 똑같은 기하학적 형상으로 나프탈렌을 주조하여 일정시간 유동장에 노출시킨 뒤, 승화된 나프탈렌의 깊이를 측정하여 물질전달계수 h_m 을 구하고, 적절한 관계식을 이용하여 열전달계수로 환산하는 방법이다.⁽⁸⁾ 본 연구에서는 측정된 물질전달계수를 물질전달 Stanton 수 $St_m (= h_m/U_\infty)$ 의 형태로 제시하였다. 이것은 다음의 식에 의해 열전달계의 Stanton 수 St 로 변환된다.

$$\frac{St}{St_m} = \left(\frac{Pr}{Sc} \right)^{n-1} \quad (1)$$

여기서 상수 n 은 대략 0.33 ~ 0.4 정도의 값을 갖는다.

나프탈렌 승화법을 적용하여 열전달계수 분포를 얻으려면, 측정하고자 하는 영역이 열전달계와 동일한 형상의 나프탈렌 면으로 주조되어야 한다. 끝벽용 나프탈렌 주형의 깊이는 8mm이며, 주형 내부에는 높이 4mm의 돌기들이 설치되어 있다. 용융된 나프탈렌은 연삭 가공된 주형덮개와 주형 사이의 공간에 주입구를 통해 주입된다. 나프탈렌이 완전히 응고된 후, 주형덮개에 충격을 가해 분리하면 매끄러운 나프탈렌 면이 얻어지며, 이것은 Fig. 1과 같이 익열에 설치된다.

주형의 각 위치에서 나프탈렌의 승화된 깊이를 측정하기 위해서 선형가변차동변환기인 LVDT (Sensotec, model 060-3590-02)를 사용하였다. 이것의 최대 측정범위는 $\pm 0.5\text{mm}$ 이며, 그 분해능은 $0.5 \mu\text{m}$ 이다. 실험시 나프탈렌의 평균 승화깊이는 대략 0.1mm 정도로 유지되었고, 최대 승화깊이는 0.3mm 정도였다. 이 LVDT는 주철 정반에 설치된 2차원 자동이송장치에 탑재되어 측정하고자 하는 위치로 자동 이송된다. 주조된 끝벽 주형은 풍동에서의 노출실험 전에 먼저 승화깊이 측정시스템에 장착되어 각 측정 위치에서 나프탈렌의 기준 깊이가 측정된다. 본 실험에서는 총 1050 위치에서 승화깊이를 측정하였고, 약 28분 정도의 시간이 소요되었다. 측정이 끝난 주형은 익열 끝벽에 설치되어 대략 90분 동안 유동장에 노출

되고, 이후 승화깊이 측정시스템에서 각 위치의 승화깊이가 측정되었다. 이 승화깊이에는 1차 승화깊이 측정이 이루어진 후 승화된 나프탈렌의 깊이, 주형을 익열에 설치하는 동안 승화된 깊이, 풍동실험이 끝난 뒤 주형을 측정시스템에 설치하는 동안 승화된 깊이, 정반에 설치된 후 2차 깊이 측정 전에 승화된 깊이 등이 모두 포함되어 있다. 따라서 이들 값을 모두 고려하여 순수하게 풍동실험에서 승화된 깊이를 구해야 한다. 실제 실험에서 이와 같이 불필요하게 승화된 깊이는 풍동실험 동안 승화된 깊이의 대략 4.5% 정도였다. 나프탈렌 주조면 근처에 설치된 T-형 열전대를 이용하여, 1차 승화깊이 측정시점부터 풍동실험을 거쳐 2차 승화깊이 측정이 끝날 때까지 전과정의 온도를 1분 간격으로 측정하였다. 이 온도 측정을 위하여 디지털전압계(Keithley, 2001)와 GPIB 보드(NI, AT-GPIB)가 사용되었고, 이 주형 열전대의 보정에는 항온조(Fisher Scientific, 9010)와 표준온도계가 이용되었다. 풍동에서의 노출 실험이 이루어지는 동안, 나프탈렌 표면의 온도의 변화는 $\pm 0.2^\circ\text{C}$ 이내였다.

본 연구에서는 자유유동속도를 20m/s로 고정하고 실험을 수행하였다. 따라서 입구유동의 Reynolds 수 $Re (= U_\infty c/\nu)$ 는 2.78×10^5 이다. 익열 입구에서 측정된 자유유동 난류강도는 0.3%이며, 경계층 운동량두께는 4.59mm이다. 입사각의 영향을 연구하기 위해 i 를 -5도와 5도로 변화시켰고, Lee 등⁽⁷⁾의 설계점($i = 0^\circ$)에서의 결과와 비교하였다. 본 연구에서는 Abernethy 등⁽⁹⁾의 방법으로 오차해석(uncertainty analysis)을 수행하였다. 그 결과 St_m 의 오차범위는 $\pm 5.7\%$ 로 계산되었다. 오차해석의 구체적인 절차는 Jun⁽¹⁰⁾에 나타나 있다.

3. 결과 및 검토

3.1 설계점에서 끝벽 근처 3차원 유동 특성

끝벽에서의 열전달 특성은 터빈 익열 통로에서의 유동특성과 밀접한 관련이 있다. Fig. 3은 끝벽 영역에서 발생하는 여러 종류의 와류들을 나타낸다.⁽⁶⁾ 그림에서 알 수 있듯이, 끝벽 근처의 3차원 유동은 크게 7개의 주요 와류로 구성된다. Fig. 3에서 박리선(separation line)은 익열로 접근하는 경계층 유동이 끝벽으로부터 박리를 시작하는 위치들을 연결한 선이며, 부착선(attachment

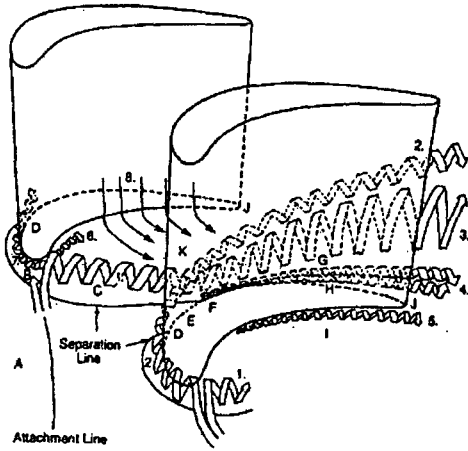


Fig. 3 Three-dimensional vortex flow pattern⁽⁶⁾ in the endwall region at $i = 0$ deg

line)은 유입 경계층 유동이 인접한 두 익열 통로로 나뉘어 흐르는 경계선을 나타낸다. 이 두 선이 만나는 교점이 바로 안장점(saddle point)이다. 입구 경계층 유동은 익형 선단 근처에서 박리선을 따라 끝벽으로부터 분리된 뒤 다시 끝벽 쪽으로 하강하는데, 이렇게 생성된 와류를 선단말발굽와류(leading-edge horseshoe vortex)라고 한다. 이 선단말발굽와류는 압력면다리(pressure-side leg) 와류 #1과 흡입면다리(suction-side leg) 와류 #2로 구성된다. 익열 통로로 유입된 유동은 익열에 의해 흐름 방향이 전환되고, 익열 통로 내부에는 압력면에서 흡입면 쪽으로 큰 압력구배가 생성된다. 이 압력구배에 의해 Fig. 3의 화살표와 같이 압력면 쪽에서 하강하여 끝벽을 따라 흡입면 쪽으로 이동하는 유동이 발생하며, 이 유동은 흡입면 근처에서 다시 미드스팬 쪽으로 상승한다. 선단말발굽와류의 압력면다리는 익열 통로를 가로질러 인접 흡입면 쪽으로 이동한다. 흡입면에 도달한 압력면다리는 통로와류(passage vortex) 즉 와류 #3으로 발달되고, 이 통로와류는 끝벽과 분리되어 상승한다. 반면에 선단말발굽와류의 흡입면다리는 익형 선단과 끝벽 사이 모서리를 따라 이동하다가 끝벽 박리선을 만나면서 상승하여 끝벽과 분리된다. 이렇게 끝벽으로부터 박리된 흡입면다리는 통로와류와 근접한 채 흡입면 근처에서 하류로 이동한다.

익형 압력면 근처에서 끝벽 쪽으로 향하는 하향류의 영향으로 압력면과 끝벽이 만나는 모서리

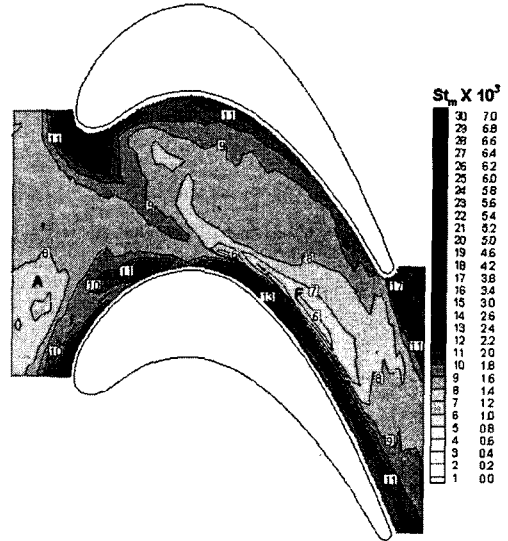


Fig. 4 Contours of St_m at $i = 0$ deg

에 압력면모서리와류(pressure-side corner vortex) 즉 와류 #5가 생성된다. 이와 마찬가지로 흡입면과 끝벽이 만나는 모서리에도 한 쌍의 흡입면모서리와류(suction-side corner vortex) 와류 #4가 생성된다. 이 흡입면모서리와류는 끝벽 박리선 하류 영역에서 발생하며, 하류로 이동하면서 그 영역이 점차 확대된다. 압력면 쪽과는 달리 흡입면 쪽의 모서리와류가 2개 발생하는 것은 통로와류의 존재와 밀접한 관련이 있는 것으로 알려져 있다.⁽⁶⁾ 앞에서 언급한 바 있는 선단말발굽와류는 익형 선단과 끝벽이 만나는 모서리에서 한 쌍의 모서리와류를 발생시킨다. 이 선단모서리와류(leading-edge corner vortex) 와류 #6과 와류 #7은 각각 선단말발굽와류의 압력면다리와 흡입면다리에 대해 반대방향으로 회전한다. 익형 끝단(trailing edge) 하류에서는 압력면 경계층유동과 흡입면 경계층유동이 서로 만나면서 강한 혼합과 전단작용이 발생하며, 이에 따라 이 후류(wake) 영역에서는 와류유출(vortex shedding)과 함께 강한 난류유동이 존재한다.

3.2 물질전달 Stanton 수

입사각이 끝벽 면에서의 열(물질)전달에 미치는 영향을 연구하기에 앞서, 설계점($i = 0$ 도)에서의 결과⁽⁷⁾를 Fig. 4에 제시하였다. Lee 등⁽⁷⁾은 St_m 의 분포를 근거로 전체 끝벽 영역을 A에서 G까지 7

개의 영역으로 구분하였다. 전체적으로 볼 때 St_m 은 익열 통로의 중심 영역에서는 비교적 작은 값을 가지며, 익형과 인접한 영역에서 큰 값을 갖는다. 익열 선단 상류에 존재하는 영역 A에서는 St_m 이 비교적 작은 값을 갖는다. 이 영역 A는 익열 통로로 유입되는 입구 경계층 유동이 익열의 존재로 인하여 유속이 감소되는 영역과 일치한다. 전체 끝벽 영역에서 St_m 이 가장 큰 곳은 익형 선단 근처의 영역 B이다. 영역 B에서 St_m 이 국소적으로 매우 큰 것은 앞 절에서 언급한 선단말발굽와류와 선단모서리와류의 존재 때문이다. 영역 A 근처에 위치하는 영역 C에서는 St_m 이 비교적 크게 나타나는데, 이 영역은 박리되지 않은 입구 경계층 흐름이 익형 흡입면과 부딪히는 영역과 일치한다. 압력면 모서리 근처에 존재하는 영역 D는 압력면모서리와류가 존재하는 곳으로 St_m 이 비교적 크다. Fig. 4의 St_m 분포를 자세히 관찰해보면, 익형 선단 근처(영역 B)에서 익열 통로를 대각선 방향으로 가로지르는 영역에서 St_m 이 비교적 큰 값을 가짐을 확인할 수 있다. 이 영역은 선단말발굽와류의 압력면다리가 하류로 발달하는 궤적과 일치한다. 이 압력면다리는 흡입면과 부딪혀 끝벽으로부터 분리되면서 통로와류로 발달하며, 이후 익형 흡입면을 따라 하류로 이동한다. 이 통로와류 아래 흡입면 모서리를 따라 영역 E가 존재하는데, 이곳에서는 흡입면모서리와류의 발달로 인하여 열(물질)전달이 촉진된다. 이 영역에서의 St_m 값은 익형 선단 영역보다는 작지만, 익열 통로 중심 영역에 비해서는 큰 값을 갖는다. 끝벽 열전달 분포 중 한 가지 특이한 점은 St_m 의 최소값이 익열 통로의 입구 즉 영역 A가 아닌 통로 내부의 영역 F에 존재한다는 것이다. 영역 F는 익형 흡입면 모서리를 따라 존재하는 영역 E의 안쪽(통로 중심부 쪽)에 흡입면 모서리와 평행하게 존재한다. 이 영역에서 St_m 이 매우 작은 것은 선단말발굽와류의 압력면다리에 의해 익열 통로 내부의 주유동이 차단되면서 끝벽 근처 유속이 감소하여, 대류 열전달이 억제되기 때문일 것이다. 영역 G는 익형 끝단 하류에 위치하는데, 이 영역에서 St_m 이 증가하는 이유는 끝단에서 발생하는 후류의 영향 때문이다. 이 후류 영역에서는 와류유출과 함께 강한 난류유동이 존재하므로 열(물질)전달이 크게 촉진된다.

Fig. 5는 입사각이 -5도일 경우의 St_m 분포를

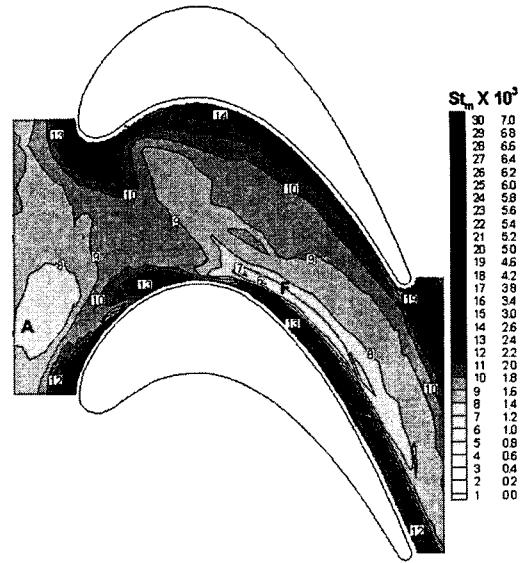


Fig. 5 Contours of St_m at $i = -5$ deg

나타낸다. 이 경우에도 끝벽 전체 영역은 설계점 (Fig. 4)에서와 같이 7개의 개별 영역으로 구분된다. 그러나 각 영역에서의 열(물질)전달 특성은 조금씩 다른 양상을 보여준다. 이때 가장 두드러진 변화는 영역 B의 선단말발굽와류 압력면다리 영역에서 관찰된다. 설계점에서는 이 영역의 궤적이 비교적 뚜렷하였지만, 입사각이 -5도인 경우에는 압력면다리 영역에서의 열전달이 감소하였다. 이와 같은 사실은 입사각이 음(-)이 되면 선단말발굽와류 압력면다리의 발달이 다소 억제됨을 의미한다. 이 압력면다리의 약화는 영역 F에서의 열(물질)전달에도 영향을 미쳐 영역 F의 범위를 축소시킨다. 설계점에 비하여 Fig. 5의 영역 D에서 열(물질)전달이 더 활발히 일어났다. 이것은 (-) 입사각에 의한 압력면 근처 유동의 불안정성이 압력면모서리와류를 강화시켰기 때문이다. 이와 함께 (-) 입사각에서는 설계점에 비하여 영역 C에서 St_m 이 더 증가함을 확인할 수 있다.

입사각이 5도일 경우의 St_m 분포는 Fig. 6과 같다. 이 경우에도 끝벽 전체 영역은 설계점 (Fig. 4)에서와 같이 7개의 영역으로 구분하는데 큰 무리가 없었다. 그러나 각 영역에서의 열(물질)전달 특성에는 많은 변화가 있었다. 가장 주목되는 변화는 영역 B의 선단말발굽와류 압력면다리 영역에서 나타났다. 입사각이 양(+)일 경우, 이 영역이 설계점에서의 결과에 비하여 크게 확대되었

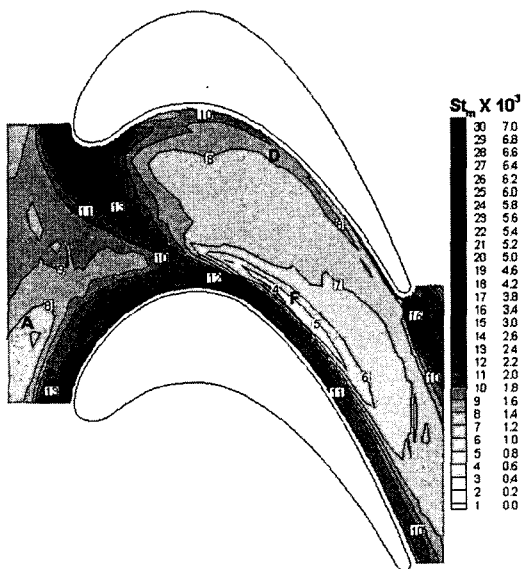


Fig. 6 Contours of St_m at $i = 5$ deg

고, St_m 도 두드러지게 증가하는 양상을 보여 주었다. 이 사실은 입사각이 (+)일 경우 말발굽와류의 압력면다리가 잘 발달됨을 의미한다. 이것은 입사각이 (-)일 경우와 정반대의 결과이다. 입사각이 5도일 때 영역 E의 폭은 $i = 0$ 도인 경우에 비해 확대되는 경향을 보인다(Fig. 7 참조). Fig. 6에서 영역 E와 인접한 영역 F의 범위 또한 상당히 넓어지고, 그 최소값 또한 매우 작았다. 입사각이 5도일 때, 영역 D에서의 열(물질)전달은 설계점의 결과보다 감소하였다. 따라서 (+) 입사각이 압력면모서리와류의 발달을 억제함을 확인할 수 있다.

Fig. 7은 익열 통로내 미드코드(mid-chord) 지점($x/b = 0.5$)에서 St_m 의 피치방향 변화를 보여 준다. 흡입면 근처를 제외하면, St_m 은 입사각이 (-)에서 (+)로 변화할수록 대체로 감소하는 경향을 보인다. 압력면 근처에서 St_m 의 분포를 보면, 입사각이 -5도일 때에는 y_p/w 가 0.95에서 극대값을 갖지만, 입사각이 0도와 5도에서는 벽 근처에 극대값이 존재한다. 이 사실은 입사각이 -5도일 때 압력면모서리와류의 범위가 가장 넓음을 의미한다. 흡입면 근처의 St_m 의 분포를 보면, 입사각이 -5도의 경우 극소값이 1개 밖에 존재하지 않지만 입사각이 0도와 5도에서는 두개의 극소값이 존재한다. 이 중 특히 벽면으로부터 더 멀리 떨어진 극소값의 위치는 입사각이 5도일 때 흡입면으로

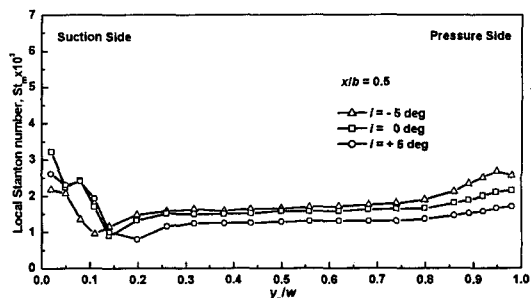


Fig. 7 Profiles of St_m at $x/b = 0.5$

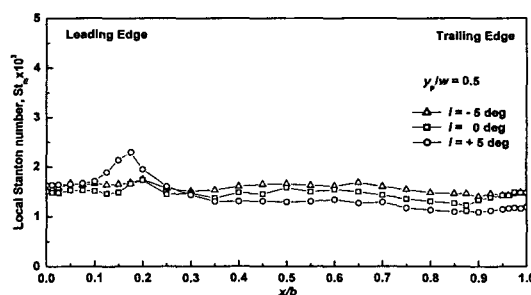


Fig. 8 Profiles of St_m along the endwall centerline ($y_p/w = 0.5$) within the cascade passage

부터 가장 멀리 떨어져 있고, 그 값이 가장 작았다. 이것은 입사각이 5도일 때 흡입면모서리와류의 영역이 가장 넓고, 그 강도가 가장 큼을 암시해 준다.

Fig. 8은 익열 통로 내부 피치방향 중심선을 따라 St_m 의 하류방향 분포를 그린 것이다. 입사각에 상관없이 x/b 가 0.1과 0.3 사이에 St_m 의 극대값이 항상 존재하였다. 이 사실은 입사각에 무관하게 선단말발굽와류의 압력면다리가 존재함을 의미한다. 그러나 입사각이 5도일 경우 그 극대값이 가장 두드러지게 나타났는데, 이것은 입사각이 5도일 경우에 선단말발굽와류 압력면다리의 발달이 가장 왕성함을 뜻한다. 입사각의 변화에 따른 통로 중심부에서의 St_m 분포를 분석해 보면, $x/b = 0.3$ 을 기준으로 그 상류에서는 입사각이 5도일 때의 St_m 이 가장 크고 그 하류에서는 입사각이 -5도일 경우의 St_m 이 가장 큰 값을 갖는다.

끝벽에 평균적으로 가해지는 열부하의 정도를 비교하기 위하여 측정영역 전체 면적에 걸쳐 평균 St_m 을 계산하였다. 그 결과 입사각이 -5도일 경우 설계점 결과 대비 7.5% 증가하였고, 입사각이 5도일 경우에는 설계점에 비하여 2.5% 감소하

였다. 일반적으로 입사각이 (+)일 경우 말발굽와류의 강화로 인하여 익형 선단 영역에서 열(물질) 전달이 촉진되나, 이 와류의 발달이 통로내 주유동의 흐름을 차단하여 하류의 넓은 영역에 걸쳐 대류 열(물질)전달을 감소시킨다. 이와는 달리 입사각이 (-)일 경우에는 약화된 선단말발굽와류가 통로내 주유동의 흐름을 원활히 하여 하류 영역에서의 열(물질)전달을 비교적 크게 증가시킨다. 이것이 입사각이 -5도일 때의 평균열부하가 증가하고, 5도일 경우 평균열부하가 감소하는 주된 이유이다.

4. 결 론

입사각이 -5도와 5도인 경우에 대하여 터빈 익형 끝벽에서의 열부하 분포를 측정하였다. 이 데이터를 설계점에서의 결과와 비교하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 본 연구에서는 끝벽 전체를 총 7개의 영역으로 나누고, 입사각이 각 영역에서의 열(물질)전달에 미치는 영향을 자세히 고찰하였다. 이 열(물질)전달 데이터로부터 입사각이 터빈 익열 통로에 존재하는 여러 와류들의 발달에 미치는 영향을 이해할 수 있었다.

(2) 입사각이 5도일 경우, 입사각이 -5도와 0도에 비해 선단말발굽와류 압력면다리의 발달이 활발하여 이 곳에서의 열부하가 크게 증가하였다.

(3) 입사각이 -5도일 경우 열부하가 설계점 대비 7.5% 증가하였고, 입사각이 5도일 경우에는 설계점에 비하여 2.5% 감소하였다.

후 기

본 연구는 금오공과대학교 학술연구비에 의하여 연구된 논문입니다. 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

(1) Wang, H.P., Olson, S.J., Goldstein, R.J. and Eckert, E.R.G., 1997, "Flow Visualization in a Linear Turbine Cascade of High Performance Turbine Blade," *ASME Journal of Turbomachinery*, Vol. 119, pp. 1~8.

- (2) Blair, M.F., 1974, "An Experimental Study of Heat Transfer and Film Cooling on Large-Scale Turbine Endwalls," *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol. 96, pp. 524~528.
- (3) Graziani, R.A., Blair, M.F., Taylor, J.R. and Mayle, R.E., 1980, "An Experimental Study of Endwall and Airfoil Surface Heat Transfer in a Large Scale Turbine Blade Cascade," *ASME Journal of Engineering for Gas Turbine and Power*, Vol. 102, pp. 257~267.
- (4) York, R.E., Hylton, L.D. and Mihelc, M.S., 1984, "An Experimental Investigation of Endwall Heat Transfer and Aerodynamics in a Linear Vane Cascade," *ASME Journal of Engineering for Gas Turbine and Power*, Vol. 106, pp. 159~167.
- (5) Gaugler, R.E. and Russell, L.M., 1984, "Comparison of Visualized Turbine Endwall Secondary Flows and Measured Heat Transfer Pattern," *ASME Journal of Engineering for Gas Turbine and Power*, Vol. 106, pp. 168~172.
- (6) Goldstein, R.J. and Spores, R.A., 1988, "Turbulent Transport on the Endwall in the Region Between Adjacent Turbine Blades," *ASME Journal of Heat Transfer*, Vol. 110, pp. 862~869.
- (7) Lee, S. W., Jun, S. B., Park, B. K. and Lee, J. S., 2004, "Effects of Combustor-Level High Inlet Turbulence on the Endwall Flow and Heat/Mass Transfer of a High-Turning Turbine Rotor Cascade," *KSME International Journal*, Vol. 18, pp. 1435~1450.
- (8) Goldstein, R.J. and Cho, H.H., 1995, "A Review of Mass Transfer Measurements Using Naphthalene Sublimation," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 10, pp. 416~434.
- (9) Abernethy, R. B., Benedict, R. P. and Dowdell, R. B., 1985, "ASME Measurement Uncertainty," *ASME Journal of Fluids Engineering*, Vol. 107, pp. 161~164.
- (10) Jun, S.B., 2000, Measurements of Endwall Heat (Mass) Transfer Coefficient in a Linear Turbine Cascade Using Naphthalene Sublimation Technique, MS thesis, Kumoh National Institute of Technology.