

연소기 출구 난류 상태에서의 터빈 익열 끝벽 열(물질)전달 특성

전 상 배*, 이 상 우**, 박 병 규***

Endwall Heat (Mass) Transfer in a Turbine Cascade Under Combustor-Level High Free-Stream Turbulence

Sang Bae Jun, Sang Woo Lee and Byung Kyu Park

Key Words : Naphthalene Sublimation Technique (나프탈렌승화법), Integral Length Scale (적분길이 스케일), Turbulence Intensity (난류강도), Endwall Heat Transfer (끝벽 열전달), Linear Turbine Cascade (선형 터빈 익열)

Abstract

Heat (mass) transfer characteristics have been investigated on the endwall of a large-scale linear turbine cascade passage under a combustor-level high free-stream turbulence with a large length scale. Local heat (mass) transfer coefficients are measured by using the naphthalene sublimation technique. The result shows that local heat (mass) transfer on the endwall is greatly enhanced in the central region of the turbine passage, but there is no noticeable change in the local heat (mass) transfer in the region suffering severe heat load. Under the high free-stream turbulence, the local heat (mass) transfer coefficient shows more uniform distribution and its average value across the whole endwall region is increased by 26% of that at low turbulence condition. The heat (mass) transfer data on the endwall strongly supports that well-organized vortices near the endwall tends to suffer an suppression by the high free-stream turbulence.

1. 서론

가스터빈 엔진의 효율을 향상시키기 위해서는 터빈 입구온도(turbine inlet temperature)를 높여야 하며, 현재 이 터빈입구 온도는 1500℃에 이르고 있다. 이와 같이 높은 입구온도 때문에 고온의 가스와 접하는 터빈의 여러 구성 요소에 대한 냉각이 필수적이며, 이에 따라 이들 고온 부품에서의 정확한 열전달계수를 알아야 적절한 냉각 시스템을 도입할 수 있다.

터빈의 끝벽은 블레이드 표면과 마찬가지로 연소기로부터 흘러오는 고온의 연소가스에 그대로

노출된다. 블레이드 끝벽 근처의 유동은 여러 종류의 와류들로 구성되는 매우 복잡한 3차원 유동이다.⁽¹⁾ 이와같은 3차원 유동은 끝벽에서의 열전달계수 분포에 큰 영향을 준다. Gaugler와 Russell⁽²⁾은 끝벽 근처 2차유동에 대한 가시화 결과와 측정된 열전달 분포를 비교하는 연구를 수행하였다. 그러나 그들이 제시한 열전달계수 분포는 경계조건 설정의 어려움과 벽면에서의 전도에 의한 오차 때문에 그 결과가 실제와 차이가 있었고, 끝벽 근처의 3차원 유동과의 연계성도 부족하였다. Goldstein과 Spores⁽³⁾는 나프탈렌승화법(naphthalene sublimation technique)을 이용하여 끝벽에서의 국소 열(물질)전달계수를 측정하였다. 그들의 실험은 자유유동의 난류강도가 1.2%로 실제 유동의 조건보다 매우 낮은 상태에서 이루어졌다. 이상우 등⁽⁴⁾은 난류강도가 1.3%와 4.7%인 두 경우에 대하여, 발전용 가스터빈 엔진의 제 1 단 동익의 끝벽에서의 열(물질)전달계수를 측정하

* 금오공과대학교 기계공학과 대학원

** 금오공과대학교 기계공학부

*** 한국기계연구원 열유체환경연구부

었다. 그 결과 이 난류강도의 변화로 인해 4.1% 정도의 열(물질)전달 증가가 있었지만, 이것은 그들의 측정오차 범위 내에 있었다.

지금까지의 대부분의 끝벽 열전달계수 측정은 난류강도가 비교적 낮은 경우에 대하여만 이루어졌다. 그러나 실제 연소기 출구 유동이 유입되는 터빈 내부의 입구 유동은 15% 이상의 매우 높은 난류강도와 큰 난류 스케일을 가지고 있다. 본 연구에서는 실제 터빈에서의 난류강도와 난류유동의 적분 길이스케일(integral length scale)이 끝벽 열전달에 미치는 영향에 대하여 연구하고자 한다. 이를 위하여 케트 분사형 난류 발생장치를 제작하였고, 나프탈렌 승화법을 적용하여 열(물질)전달계수를 측정하였다.

2. 실험

2.1 나프탈렌 승화법

열전달의 연구에 있어서 열전달과 물질전달의 유사성(heat/mass transfer analogy)을 이용한 실험 방법이 널리 이용되고 있다. 나프탈렌승화법은 그 중 한 방법으로 열전달계(heat transfer system)와 똑같은 기하학적 형상으로 나프탈렌을 주조하여 일정시간 유동장에 노출시킨 뒤, 승화된 나프탈렌의 깊이를 측정하여 물질전달계수(mass transfer coefficient)를 구하고, 적절한 관계식을 이용하여 열전달계수(heat transfer coefficient)를 구하는 방법이다.⁽⁵⁾ 열전달계에서 일정한 온도로 유지되는 고체 표면에서의 열전달계수는 다음과 같이 정의된다.

$$q = h(T_w - T_\infty) \quad (1)$$

여기서 T_w 와 T_∞ 는 각각 벽면과 자유유동의 온도이고, h 는 열전달계수이다. 물질전달계(mass transfer system)에서 나프탈렌 면에서의 표면온도가 일정하게 유지된다면, 그 곳에서의 나프탈렌의 증기압이 일정하므로 나프탈렌의 농도가 일정하다. 이와 같은 물질전달계의 등농도 조건은 열전달계에서는 등온 조건에 해당된다. 일반적으로 물질전달계수 h_m 은 다음과 같이 정의된다.

$$\dot{m} = h_m(\rho_{v,w} - \rho_{v,\infty}) \quad (2)$$

이 식은 열전달계의 식 (1)과 대응된다. 여기서 $\rho_{v,w}$ 는 나프탈렌 표면에서의 나프탈렌 증기의 농도이고, $\rho_{v,\infty}$ 는 자유유동에서 나프탈렌 증기의

농도이다. 그런데 이 유동장에서의 나프탈렌 농도 $\rho_{v,\infty}$ 는 0이므로, 물질전달계수는 다음과 같이 된다.

$$\dot{m} = h_m \rho_{v,w} \quad (3)$$

나프탈렌 표면에서의 질량유속(mass flux) \dot{m} 은 실험 중 승화된 나프탈렌의 깊이 δz 를 측정함으로써 다음의 식으로 얻어진다.

$$\dot{m} = \rho_s \frac{\delta z}{\delta t} \quad (4)$$

여기서 ρ_s 는 고체 나프탈렌의 밀도이고, δt 는 유동장에 노출된 시간이다. 따라서 식 (3)과 식 (4)로부터 물질전달계수는 다음의 식으로 구해진다.

$$h_m = \frac{\rho_s}{\rho_{v,w}} \frac{\delta z}{\delta t} = \frac{\rho_s}{P_{v,w}/RT_w} \frac{\delta z}{\delta t} \quad (5)$$

이 식에서 나프탈렌 벽면에서의 증기압 $P_{v,w}$ 는 벽면 온도에 매우 민감하므로, 이 벽면 온도에 직접적으로 영향을 주는 주유동의 온도를 일정하게 유지시킬 필요가 있다. 본 연구에서는 Ambrose 등⁽⁶⁾이 제안한 증기압 실험식을 사용하여 $P_{v,w}$ 를 구하였다.

일반적으로 Prandtl 수 Pr 과 Schmidt 수 Sc , 난류 Prandtl 수 Pr_t 와 난류 Schmidt 수 Sc_t 가 각각 서로 같고, 열전달계와 물질전달계의 경계 조건이 서로 유사하다면, 열전달계와 물질전달계의 지배방정식이 서로 유사하게 된다. 따라서 이 경우 열전달계수와 물질전달계수가 서로 같게 된다. 난류유동에 있어서 Pr_t 와 Sc_t 가 서로 같음이 실험적으로 입증되었지만⁽⁶⁾, 공기중에서 확산되는 나프탈렌의 Sc 와 Pr 은 서로 같은 값을 갖지 않는다. 만약 열전달과 물질전달이 Stanton 수의 형태로 무차원화된다면 다음의 식이 성립된다.

$$\frac{St}{St_m} = \left(\frac{Pr}{Sc} \right)^{n-1} \quad (6)$$

식 (6)에서 상수 n 은 대략 0.33 ~ 0.4 정도의 값을 갖는다. St_m 은 다음과 같이 정의되는 무차원수이다.

$$St_m = \frac{h_m}{U_\infty} = \frac{Sh}{Re_\infty Sc} \quad (7)$$

2.2 실험장치

본 연구에서 사용된 익열 풍동(cascade wind

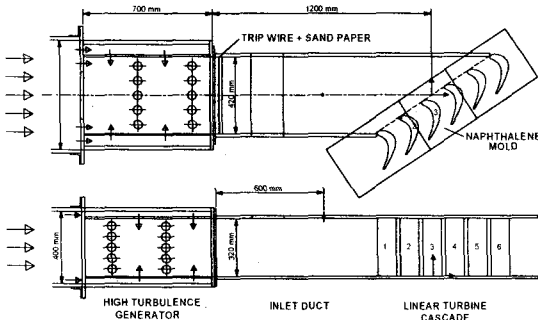


Fig. 1 Overall view of cascade wind tunnel

tunnel)은 개방형 풍동, 제트 난류발생기(high turbulence generator), 익열 입구덕트, 익열 등으로 구성된다(Fig. 1). 개방형 풍동은 면적축소비가 9.0이고, 출구의 단면은 600mm×400mm이다. 이 개방형 풍동의 출구에는 길이 1.8m의 사각덕트가 연결되어 있고, 그 하류의 난류발생기를 통과한 유동은 익열 입구덕트로 유입된다. 이 입구덕트의 단면은 420mm×320mm이고, 폭방향 중심에서의 길이는 1.2m이다. 이것의 입구 상하 벽에는 직경 2mm의 트립와이어와 사포(sand paper)가 차례로 부착되어 있어서, 상하 벽 근처의 유동이 난류 경계층으로 발달된다. Fig.1에서 알 수 있듯이 익열에는 총 6개의 선형 블레이드가 설치되어 있다. 이것은 산업용 가스터빈의 터빈 제 1 단동의 미드 스패ن 형상을 근거로 large-scale로 제작되었다. 이 선형 블레이드의 코드길이(c), 피치(p), 스패น(s)는 각각 217.8mm, 151.6mm, 320.0mm 등이다. 나머지 중요 제원은 Fig.2에 제시되어 있으며, 그 형상 좌표는 이상우 등⁽⁴⁾에 자세히 기술되어 있다.

본 연구에서는 실제 터빈 내부에서와 같은 난류강도 15% 이상의 유동조건을 실현하기 위해서, Fig.1과 같은 연소기 시뮬레이터 형태의 난류발생기를 제작하였다.⁽⁷⁾ 그 결과 높은 난류강도와 큰 적분길이스케일을 유지하면서, 유동속도, 난류강도, 스케일 등이 유동 단면에 걸쳐 거의 균일한 유동장을 얻을 수 있었다. 이 난류발생기 입구에서 주유동이 상하, 좌우의 4개의 직사각형 플레넘에 나누어 공급된 뒤, 이 플레넘 내부 벽에 뚫려 있는 원형 분사구멍을 통하여 분사되는 구조로 되어 있다.

본 연구에서는 IBM PC AT-486으로 전체 온도, 경계층 속도, 난류 측정시스템을 온라인화하였으며, 이를 위해 다기능입출력보드 (National

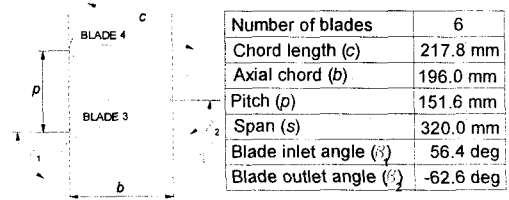


Fig. 2 Arrangement of turbine blade cascade

Instruments, AT-MIO-16D-H-9)가 컴퓨터에 내장되어 있다. 압력변환기 (Furness Controls, FCO12)에 의해 변환된 압력신호는 다기능입출력보드의 12비트 A-D변환기를 통해 컴퓨터로 전달된다. 경계층 유동 측정시, 프로우브의 정밀한 이송을 위해 3차원 자동이송장치를 사용하였다. 이 장치는 세 축방향으로 컴퓨터에 의해 자동이송되는데, 각 이송축은 볼나사와 직선운동가이드로 이루어진 직선유닛, 스테핑모터 및 스테핑모터 드라이버 등으로 구성되어 있다. 이 3차원 이송장치는 수평조절이 가능한 지지대에 탑재되어 있다. 스테핑모터는 전용 드라이버의 펄스입력을 통해서 제어는데, 이 디지털 펄스는 다기능입출력보드로부터 공급된다.

입구 자유유동의 난류강도 T_i 와 적분길이스케일 L 을 측정하기 위해서 정온형 열선유속계 (Kanomax, 1010)와 선형화기(Kanomax, 1013)를 사용하였다. 적분길이스케일을 측정하는 방법에는 여러 가지 기법이 있지만 본 연구에서는 Camp와 Shin⁽⁸⁾과 같이 autocorrelation 함수로부터 적분시간 스케일(integral time scale)을 구하고 Taylor의 가정을 이용하여 적분길이스케일을 구하는 방법을 사용하였다.

2.3 측정 방법

나프탈렌승화법을 적용하여 열전달을 연구하려면, 측정하고자 하는 영역이 열전달계와 동일한 형상의 나프탈렌 면으로 주조되어야 한다. 본 연구에서 사용한 끝벽용 나프탈렌 주형의 크기는 280mm×280mm이고 깊이는 8mm이며 주형 내부에는 높이 4mm의 돌기들이 설치되어 있다. 용융된 나프탈렌은 연삭 가공된 주형덮개와 주형 사이의 공간에 주입구를 통해 주입된다. 나프탈렌이 완전히 응고된 후, 주형덮개 충격을 가해 제거하면 매끄러운 나프탈렌 면이 얻어진다. 이것을 Fig.1과 같이 익열에 설치하고 유동장에 노출하면, 나프탈렌이 국소적으로 서로 다르게 승화

된다.

주형의 각 위치에서 나프탈렌의 승화된 깊이를 측정하기 위해서 선형가변차동변환기 즉 LVDT(Linear Variable Differential Transformer)를 사용하였다. 이 LVDT(Sensotec, model 060-3590-02)의 최대 측정범위는 $\pm 0.5\text{mm}$ 이며 그 분해능은 $0.5\ \mu\text{m}$ 이다. 실험시 평균 나프탈렌 승화깊이는 대략 0.1mm 정도로 유지되었고, 최대 승화깊이는 0.30mm 정도였다. 이 LVDT는 주철 정반에 설치된 2차원 자동이송장치에 탑재되어 측정하고자 하는 위치로 자동 이송된다. 풍동에서의 노출 실험시, 평균온도는 대략 26.0°C 정도였고, 온도의 변화는 이 평균 온도의 $\pm 0.2^\circ\text{C}$ 이내였다. 최종적으로 구한 δz 를 풍동실험 시간 δt 로 나누면 이 시간 동안 승화된 나프탈렌의 평균 깊이가 계산된다. 이 값을 식 (5)에 대입하여 물질전달계수 h_m 을 구하고, 이 h_m 을 식 (7)와 같이 U_∞ 로 무차원화하면 물질전달 Stanton 수 즉 St_m 이 얻어진다. 물론 이 St_m 은 열전달과 물질전달의 상사성을 나타내는 식 (6)에 의해 열전달의 Stanton 수 St 로 변환될 수 있다.

본 연구에서는 자유유동의 난류강도가 매우 작은 경우(Case 1)와 난류발생기가 설치된 경우(Case 2)에 대하여 실험을 수행하였다. 이 두 경우 모두 자유유동속도를 20m/s 로 고정하고 실험을 수행하였다. 따라서 입구유동의 Reynolds 수 ($Re = U_\infty c/\nu$)는 2.78×10^5 이었다. Case 1의 경우, $x/c = -1.5$ 에서 자유유동 난류강도는 1.2%이며, 경계층두께, 배제두께, 운동량두께는 각각 44.7mm , 5.16mm , 4.04mm 이다. Case 2의 경우, $x/c = -1.5$ 에서 자유유동 난류강도와 적분길이 스케일은 각각 14.7%와 80.0mm 이며, 경계층두께, 배제두께, 운동량두께는 각각 28.0mm , 2.28mm , 1.92mm 이다.

3. 결과 및 검토

본 연구에서 측정한 국소 물질전달계수는 물질전달 Stanton 수 St_m 의 형태로 제시되었다. Fig.3은 난류발생기가 설치되지 않은 경우(Case 1)의 국소 물질전달 Stanton 수 St_m 의 분포를 나타낸다. 전체적으로 볼 때, St_m 은 끝벽에서 국소적으로 크게 변화하며, 그 값은 최소 1.0×10^{-3} 정도에서 최대 5.4×10^{-3} 에 이른다. 결과를 명확히 보여주기

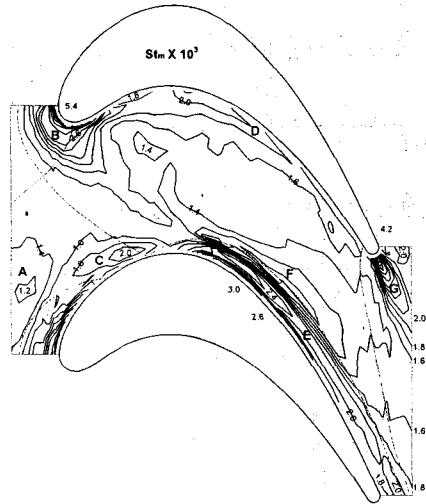


Fig.3 Contours of St_m at low turbulence intensity

위해 St_m 이 2.6×10^{-3} 보다 작을 경우 0.2×10^{-3} 의 간격으로 등 St_m 선을 그렸고, St_m 이 2.6×10^{-3} 보다 클 경우 0.4×10^{-3} 의 간격으로 등 St_m 선을 표시하였다.

본 연구에서는 St_m 의 분포를 근거로 끝벽을 7개의 영역, 즉 영역 A에서 영역 G로 구분하였다. 익열의 입구에 존재하는 영역 A에서는 St_m 이 비교적 작은 값을 갖는데, 이것은 아직 블레이드 선단에 의하여 경계층 유동이 교란되지 않았기 때문이다. 이 영역 A는 끝벽 박리선의 상류에 존재한다. 가장 심한 국소 열(물질)전달은 블레이드 선단과 끝벽 박리선으로 둘러싸인 영역 B에서 관찰된다. 이 영역에서 St_m 의 최대치는 블레이드 선단과 끝벽이 만나는 모서리 근처에서 발생하며, 그 값은 5.4×10^{-3} 에 이른다. 이 값은 영역 F에서 나타나는 St_m 의 최소치의 대략 5배에 이르는 매우 큰 값이다. 이 사실을 블레이드 선단 모서리에서 발생하는 선단 모서리 와류가 익열 끝벽 근처에서 발생하는 여러 와류들 중 그 강도가 가장 큼을 의미한다. 영역 B는 길고 짧은 두 개의 화살표로 표시된 압력면 및 흡입면 날개형상 영역을 가지고 있다. 이 중 긴 압력면 날개는 부착선으로부터 시작하여 끝벽 박리선과 거의 평행하게 익열 통로를 가로질러 인접 블레이드의 흡입면까지 뻗어 있다. 이 압력면 날개는 선단 말발굽 와류의 압력면 다리에 의해 생성된 것이므로, 이것으로부터 압력면 다리의 위치를 추정할 수 있다. 흡입면 날개는 선단 말발굽 와류의 흡입면 다리가 존재하는 반대편 통로에 위치하며, 압력면 날개

와는 달리 매우 좁은 범위를 가지고 있다. 영역 C는 통로로 접근하는 경계층 유동이 끝벽 박리선을 넘어 박리되지 않은 채, 흡입면 쪽으로 이동하여 흡입면과 만나는 곳과 거의 일치한다. 따라서 이 영역에서의 끝벽 근처 유속은 박리 영역의 유속보다 더 클 것으로 판단되며, 이에 따라 이곳에서의 열(물질)전달계수는 비교적 큰 값을 갖게 된다. 영역 D는 블레이드 압력면 모서리와류가 존재하는 영역에 해당하며, 이 모서리와류의 영향으로 열(물질)전달이 소폭 증가한다. 영역 E는 블레이드 흡입면을 따라 길게 뻗어 있는데, 이 영역에는 1쌍의 흡입면 모서리와류가 존재하므로, St_m 의 구배가 매우 클 뿐만 아니라, 열(물질)전달도 두드러지게 증가한다. 선단 말발굽와류의 압력면 다리는 Fig.3의 긴 화살표를 따라 하류로 이동하다가, 인접 블레이드의 흡입면을 만나면 흡입면을 타고 상승하여 통로와류로 발달된다. 이 통로와류에 의해 주유동의 흐름이 차단되면서 그 아래 끝벽 근처에 1쌍의 흡입면 모서리와류가 생성된다. Fig.3의 열(물질)전달 분포로 판단해 보면, 흡입면 모서리와류의 시작점은 대략 선단 말발굽와류의 압력면 다리의 연장선과 블레이드 흡입면 모서리가 만나는 영역 근처로 추정된다. 이 흡입면 모서리와류의 시작점 근처에서의 St_m 이 영역 E 전체에 걸쳐 가장 큰 값을 갖으며, 이 모서리와류가 하류로 발달함에 따라 St_m 은 감소되는 경향을 보인다. 끝벽에서의 측정 영역 전체를 통틀어 볼 때, St_m 은 영역 F에서 최소값을 가지며, 그 값은 대략 1.0×10^{-3} 에 불과하였다. 이와 같이 영역 F에서 열(물질)전달이 가장 작게 나타나는 이유는 통로와류의 배면에 위치하는 영역 F에서 벽 근처 유속이 가장 작고, 흡입면 모서리와류의 영향 또한 이 영역까지 미치지 못하기 때문으로 추측된다. 마지막으로 블레이드 끝단 하류 후류(wake)에 해당하는 영역 G에서도 St_m 이 매우 크게 나타났다. 이것은 끝단으로부터 떨어져 나가는 주기적인 와류 유출(vortex shedding)이 발생하기 때문이다. 영역 A에서 영역 G로 구분된 곳들을 제외한 끝벽 측정 위치에서는 St_m 이 1.4×10^{-3} 부터 1.6×10^{-3} 사이의 값을 가짐을 확인할 수 있다. 실험조건과 블레이드의 형상이 본 연구와 다른 Goldstein과 Spore⁽³⁾에서도 본 연구와 정성적으로 비슷한 열(물질)전달 분포가 나타났다.

Fig.4는 난류발생장치가 상류에 설치되어 자유유동 난류강도가 매우 큰 경우(Case 2)의 국소 물

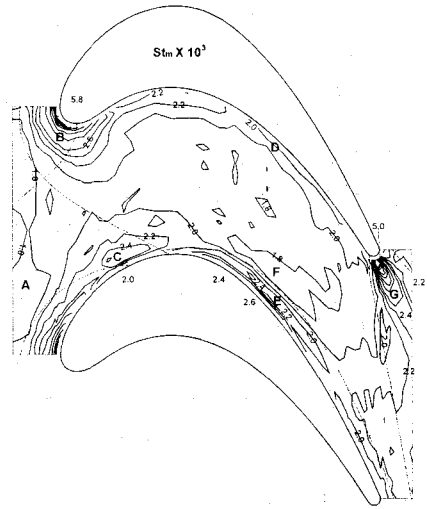


Fig.4 Contours of St_m under combustor-level high free-stream turbulence

질전달 Stanton 수 St_m 의 분포를 나타낸다. 이 경우 난류강도와 적분길이스케일은 각각 14.6%이고 80mm로 실제 가스터빈의 엔진 조건과 비슷하다. 전체적으로 볼 때, 열(물질)전달 특성은 자유유동의 난류 특성에 관계없이 Fig.3과 정성적으로 비슷한 경향을 보여 준다. 그러나 Fig.4의 경우 익열 통로 중심 영역에서의 열(물질)전달이 Fig.3에 비해 두드러지며, St_m 은 1.8×10^{-3} 에서 5.8×10^{-3} 사이의 값을 갖는다. 따라서 Fig.4에서 St_m 의 최소값은 Fig.3에 비해 2배정도 크고, 최대값은 거의 동일함을 알 수 있다. 자유유동의 난류강도가 클 경우에도 블레이드 선단 근처 끝벽에서 열(물질)전달계수가 매우 크게 나타났고, Fig.3에서와 같이 선단 말발굽와류의 압력면 및 흡입면 다리에 의한 열(물질)전달의 증가 영역은 거의 존재하지 않았다. 이와 같은 사실은 선단 말발굽와류의 압력면 및 흡입면 다리가 난류 혼합작용에 의하여 크게 약화되었음을 의미한다. 자유유동 난류성분의 증가로 인한 끝벽 열(물질)전달의 가장 큰 변화는 흡입면 모서리를 따라 관찰된다. 즉 영역 E에서의 열(물질)전달이 난류강도의 증가로 가장 큰 변화를 겪는데, Fig.4와 같이 St_m 의 최대치가 조금 감소하지만, 그 구배는 크게 감소된다. Fig.4의 영역 F에서는 Fig.3에 비하여 열(물질)전달이 크게 촉진된다. 이에 따라 익열 통로 내부 끝벽에서 St_m 의 최소값은 Fig.3에 비해 2배 가량 증가하게 된다. 이와 같은 영역 F에서의 St_m 의 증가는 필연적으로 영역 E와 영역 F 사이에서 St_m 의 구

배를 크게 감소시키게 되는 것이다. Fig.4에서도 블레이드 끝단 하류 후류 영역의 열(물질)전달이 크게 증가하였고, 그 최대치가 Fig.3의 경우보다 조금 더 크게 나타났다. 영역 A에서 영역 G를 제외한 끝벽에서의 St_m 은 대부분 1.8×10^{-3} 에서 2.0×10^{-3} 사이에서 변화하였다. 대체적으로 이 나머지 끝벽 영역에서는 열(물질)전달이 난류발생기가 설치되지 않은 경우에 비하여 30% 정도 증가하는 경향을 보여 주었다. Fig.3과 Fig.4의 결과를 종합해 보면, 자유유동 난류강도가 크게 증가하여도 기존에 와류들이 존재하던 영역에서의 열(물질)전달의 증가는 비교적 작은 반면에, 그 이외의 영역에서는 열(물질)전달이 큰 폭으로 증가함을 확인할 수 있었다.

측정영역 전체에 걸쳐 평균된 물질전달 Stanton 수는 Case 1과 Case 2에서 각각 1.69×10^{-3} 와 2.13×10^{-3} 로 계산되었다. 따라서 난류발생기가 설치된 경우의 열부하가 그렇지 않은 경우에 비하여 대략 26% 더 증가함을 알 수 있다.

4. 결론

(1) 열부하가 심한 영역은 자유유동 난류강도에 관계없이 항상 블레이드 선단 근처 및 끝단 근처에서 발생하였고, 이 영역에서의 열부하의 크기는 난류강도에 거의 무관하였다.

(2) 3차원 와류의 영향이 비교적 작은 익열 통로 중심부에서는 난류강도가 클 경우 열부하가 크게 증가하는 경향을 보여 주었다.

(3) 난류강도의 변화에 따라, 선단 말발굽와류의 압력면 다리에 해당하는 영역과 흡입면 모서리 와류가 존재하는 영역에서의 열(물질)전달 특성이 가장 두드러지게 변화하였다.

(4) 난류강도가 클 경우, 끝벽 전체에 걸쳐 평균된 열부하는 26% 정도 증가하였다. 그러나 이때 열부하의 분포는 오히려 더 균일해지는 경향을 보여 주었다.

후기

본 논문은 과학기술부가 지원하는 특정연구개발사업중 중점국가연구개발사업(기계설비요소기술개발)으로 지원되어 수행하였습니다. 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) 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. 715.
- (3) 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.
- (4) 이상우, 전상배, 박병규, 2001, "나프탈렌승화법을 이용한 터빈 익열 끝벽에서의 열(물질) 전달계수 측정," 대한기계학회논문집(B), 제 25권, pp. 356~365.
- (5) 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.
- (6) Ambrose, D., Lawrenson, I.J. and Sprake, C.H.S., 1975, "The Vapour Pressure of Naphthalene," *J. Chem. Thermodynamics*, Vol. 7, pp. 1173~1176.
- (7) Chung, J.T. and Simmon, T.W., 1993, "Effectiveness of the Gas Turbine Endwall Fences in Secondary Flow Control at Elevated Free-stream Turbulence Levels," *ASME Paper No. 93-GT-51*.
- (8) Camp, T.R. and Shin, H.W., 1995, "Turbulence Intensity and Length Scale Measurements in Multi-stage Compressors," *ASME Journal of Turbomachinery*, Vol. 117, pp. 38~46.