대한기계학회 2001년도 추계학술대회논문집 B pp. 36~41 KSME 01F151

후류의 영향을 고려한 터빈 캐스케이드내 열전달 현상에 대한 실험적 연구

민홍기* · 정진택**

Experimental Study on the Heat Transfer under the Effects of Wake In a Turbine Cascade

H. K. Min, J. T. Chung

Key Words: Turbine Cascade(터빈 캐스케이드), Boundary Layer Thickness(경계층 두께) Color Image Processing System(칼라 영상 처리 장치), Liquid Crystal(액정) Stator(정익), Rotor(동익), Hue(색상), 채도(Saturation), Intensity(명도)

Abstract

In order to simulate wake of stator and a gas turbine engine's balde row, acryl cylinder and a linear turbine cascade were used respectively in this study. Experimental of heat transfer distributions was done on the passage endwall and blade suction surface. Temperature distributions on the experimental regions were obtained through image processing system by using the cholesteric type liquid crystal which has chain structure of metyl(CH_3). To represent the degree of heat transfer, dimensionless St number was used.

The results show that heat transfer on the blade suction surface was increased due to the wake from the cylinder and was decreased as the distance between cylinder row and blade row increases. Because of groth of passage vortex, heat transfer distributions on the trailing edge area showed triangular shape which was little changed with wake. On the other hand, heat transfer on the passage endwall was decreased due to the wake from cylinder. As the distance between cylinder row and blade row increases, heat transfer was more decreased.

기호설명

h : 대류 열전달 계수

H : 색상(Hue)

S : 채도(Saturation)

I : 명도(Intensity)

q'' : 단위 면적당 열유속(heat flux)

St : Stanton number

T_w : 액정 표면 온도

* LG 전자

** 고려대학교 기계공학과

1. 서 론

20세기 초중반이후 이용되기 시작한 이래, 가스터빈엔진은 항공기 발전등에 이용되고 있으며, 유럽 미국 일본에서는 대형버스등에도 이용하고 있다. 가스터빈엔진의 효율향상을 위해서는 연소가스의 온도와 압력이 높을수록 커지지만, 가스터빈엔진 구성요소들의 재료적 한계로 인하여 연소가스의 온도와 압력은 제한을 받게 된다. 고온고압의 연소가스와 블레이드의 직접적인 접촉을 방지하기 위하여 막냉각법(Film cooling method)이 실재 많이 이용되고 있으며, 경계층 펜스를 이용한 실험등이 다양하게 진행되고 있다.[1]

실재 터빈 블레이드는 회전하고 있고, 정익과

동익을 한단으로 하여 다단으로 이루어져 있기 때문에 실험이 용이하지 않아 블레이드를 2차원으로 성형하여 캐스케이드 형태로 배열하여 실험이 이루어 지고 있다. Hippensteele[2] 은 액정을 이용하여 캐스케이드내에서 레이놀즈수에 따라 열전달 실험을 수행하여 압력면에서보다 흡입면에서 열전달이 왕성하게 일어난다고 하였다. 액정은 특정한 온도영역내에서 색이 변하는 물질로 응답특성이 빠르고 반복성이 좋아 열전달 실험에 유용하게 쓰이는 물질이다.

캐스케이드 통로내에서의 유동은 Langston[3] Moore[4], Sieverding[5], 등에 의하여 실시 되었으며 공통적인점은 블레이드 앞전에서 역압력 구배에 의하여 말굽와류의 압력면 성분과 흡입면성분으로 나누어진다는 것이었으며, 말굽와류가 통로내를 진행하면서 변화하는 양상은 다르다는 실험결과를 발표했다. 이렇게 통로내에서 말굽와류의 변화 양상이 다른 이유는 블레이드의 형상이 다르기 때문으로 생각된다.

정익의 후류효과를 고려하기 위해서 곡률의 베인형상을 이용한 실험과 실린더를 설치한 실험이 있었는데, 전자는 지나친 후류로 인하여 캐스케이드내부의 유동이 불안하게 나타났으며, 후자의 경우는 실제정익의 형상과 다르다는 맹점이 있긴 하였으나 캐스케이드 내부의 유동에 후류가 미치는 효과를 살펴보기에는 무리가 없었다.[6][7]

후류의 효과를 고려하지 않은 캐스케이드내에서의 열전달 실험과 후류를 고려한 캐스케이드내부의 공력실험은 많이 이루어 졌지만, 후류의 효과를 고려한 캐스케이드내부에서의 열전달 실험은 미미한 실정이다. 이에 본 연구에서는 직경 10mm의 실린더를 이용하여 정익의 후류효과를 고려한후, 실린더열과 블레이드열의 떨어진 정도에 따라 액정을 이용하여 캐스케이드내 통로끝벽과 흡입면에서의 열전달 정도를 실험하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 블레이드 및 캐스케이드 시험부

실제 블레이드 단면은 2차원 이지만, 스팬방향으로 굴곡이 있는 3차원 형상으로 되어있다. 본실험에서 사용한 블레이드는, 캐스케이드 통로내에서 유동을 잘 살펴보고 끝벽들의 상호작용을 최소화한 형상으로 FRP 수지를 이용해서 만들었다. Table 2.1은 자세한 블레이드 형상 자료이다.

Table. 2.1 Geometry of the blade

Chord (C)	230 mm
Axial chord to chord ratio (C_{ax}/C)	0.704
Aspect ration (H_b/C)	2.0
Solidity (C/P)	1.33
Blade inlet angle (β_1)	-35°
Blade outlet angle (β_2)	72.5°
Turning angle	107.5°
Incidence angle	0°

Fig 2.1은 실린더를 블레이드 앞전에 설치했을 때의 모습이다.

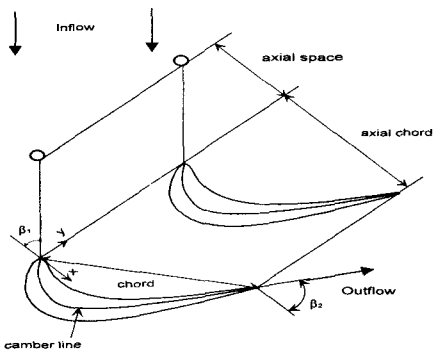

Fig 2.1 Geometry of the cylinder and blade

실험에 사용된 풍동은 축류형 풍동으로서 풍동 자체의 시험부 단면은 1m×0.8m 이고, 시험부 길이는 3m이다. 캐스케이드를 포함하는 시험부를 따로 제작하여 풍동에 삽입하는 형태로 시험부를 구성하였다. 캐스케이드 시험부는 아크릴로 제작하였으며, 입구의 단면은 균일하게 폭 707mm, 높이 460mm로 하였다. 블레이드는 총 6개로 캐스케이드 형태로 위치시켰으며, 각각의 통로마다 유동이 균일하게 들어오도록 하기 위해서 양쪽끝의 블레이드에 유동 조절판을 조절하여 가운데 3개통로 뒷전에 설치한 정압공의 정압을 측정하여 주기성을 맞추어 주었다.

시험부 입구로 들어오는 유동의 난류강도와 캐스케이드 입구로 들어오는 유동의 경계층 두께는 I-type hot wire를 이용하여 측정하였다. Fig 2.2는 풍동에 삽입한 시험부의 모습이다.

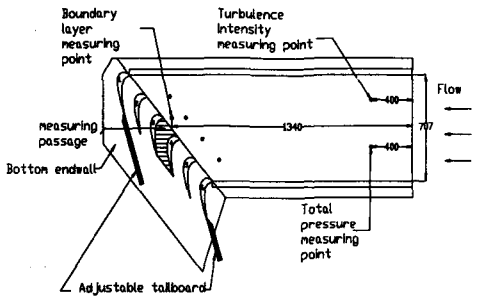

Fig 2.2 Top view of the cascade test section

2.2 액정의 특성과 열전달측정 방법

특정온도 영역에서 2개의 녹는점을 갖는 액정은 오스트리아의 식물학자 Friedrich Reninizer가 1888년 발견한 물질로서 제1녹는점과 제2녹는점 사이에서 독특한 색을 나타내며, 온도변화에 따른 색의 변화속도는 1/1000초 정도로 거의 순간적으로 변화하여 응답성이 매우 빠르다. 액정은 구조에 따라 Smetic, Nematic, Cholesteric형태로 구분되며, 본실험에서 사용된 액정은 Cholesteric 구조이다. 이 액정은 편광의 성질이 있으며, 30℃~35℃사이에서 액정의 색이 변화하는 온도영역을 갖고 있고, 미국의 Hallcrest사에서 제조한 제품이다.

균일 열유속 조건으로 특정영역에서 열전달의 정도를 파악하기 위해서는 온도변화를 측정해야 한다. 액정의 색변화로 온도변화를 직접알수 없기 때문에 프로그램을 이용하여 다음과 같은 방법으로 열전달의 정도를 알아보게 된다.

액정의 색변화를 CCD카메라를 이용하여 영상처리 Board에 입력한다. 프로그램을 이용하여, 저장된 영상을 열전달측정 대상영역의 모든 Pixel에 대하여 Red, Green, Blue값이 어느정도 포함되어 있는지 구한다. R,G,B값을 가지고 색의 3속성인 색상(Hue), 채도(Saturation), 명도(Intensity)로 전환을 한다. 이중에서 색상은 온도에 대하여 선형성이 있기 때문에 색상대 온도에 대한 곡선을 미리 구하는 보정곡선을 구하면, 보정곡선을 이용하여 특정영역에서 온도의 변화를 알수있으며 다음과 같은 식으로 무차원수인 St number로 전환하여 나타낼 수 있다.

$$q'' = \frac{V^2}{R_t \times A} \quad [W/m^2] \quad \text{.....(2.1)}$$

$$h = \frac{q''}{(T_w - T_\infty)} \quad [W/m^2K] \quad \text{.....(2.2)}$$

$$St = \frac{h}{\rho_\infty C_p U_\infty} \quad \text{.....(2.3)}$$

2.1과 2.2식을 이용하여 대류열전달 계수 h를 구할수 있으며, 2.3식을 이용하여 무차원수인 St number로 냐타낼수 있다.

보정을 하기위하여 제작된 가열판은 실제실험과 같은 환경에서 이루어지도록 하기 위해서 제작된 가열판을 캐스케이드의 블레이드에 부착하여 보정실험을 실시했다. Fig 2.3은 온도대 채도,명도의 관계이며, 2.4는 온도대 색상과의 관계이다.

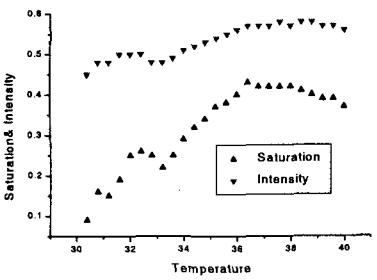

Fig 2.3 Correlations of Saturation and Intensity vs Temperature

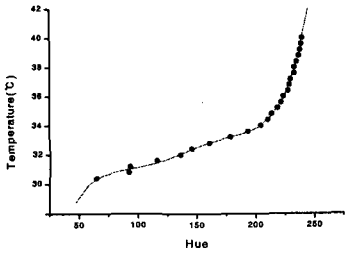

Fig 2.4 Correlation of hue vs temperature

3. 실험 결과 및 고찰

풍동에 설치된 시험부내로의 유입유동 속도는 시험부 입구에서 하류로 400mm지점에서 피토관을 벽면으로부터 영향을 받지 않도록 위치시켜 측정하였으며, 유속은 10m/s 이다. 코드길이에 대한 레이놀즈수는 1.5×10^5 이였으며, 유입유동이 균일하게 들어오는지 확인하기 위해서 I-type 열선유속계를 피토관 옆에 상호간섭이 일어나지 않도록 위치시켜 난류강도와 균일성을 측정하였다. 끝벽으로부터 60mm, 측벽으로부터 50mm떨어진 위치에서부터 50mm씩 이송하면서 전 평면에 대해서 측정이 이루어졌으며, 난류강도와 균일성은 모두 1% 이내로 나타났다. Fig 3.1은 난류강도가 가장클것으로 예상되는 끝벽에 가장 가까운 위치일때의 실험결과이다.

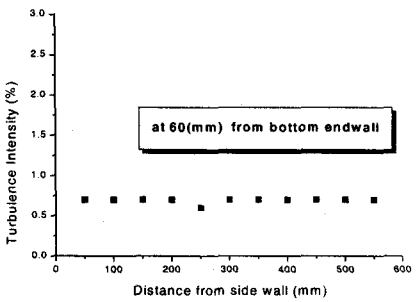

Fig 3.1 Turbulence intensity at 60mm from bottom endwall

3.1 캐스케이드 흡입면에서의 열전달 분포

실린더열과 블레이드열의 떨어진 정도와 실린더의 비정상상태 회전효과를 나타내기 위한 실린더열의 이동정도를 표시하기 위해서 Case_1_1과 같은 방법으로 나타내었다. 처음의 1은 실린더열과 블레이드열의 떨어진 정도가 코드길이의 1/4를 나타내며, 2는 코드길이의 2/4만큼 떨어짐을 나타낸다. 두 번째1은 실린더열과 블레이드 앞전의 연결선이 벗어난 정도를 나타내며, 0일 때는 연결선이 일치함을 1은 피치의 1/4만큼 압력면으로부터 흡입면 방향으로 떨어져 있음을 나타낸다.

흡입면에서의 열전달 실험은 Xs축을 코드길이로 무차원화 하였을 때 0.7과 1.3영역사이에서 이루어 졌으며, 스팬방향으로는0~0.5영역에서 이루어 졌다. Fig 3.2는 블레이드의 좌표축이다.

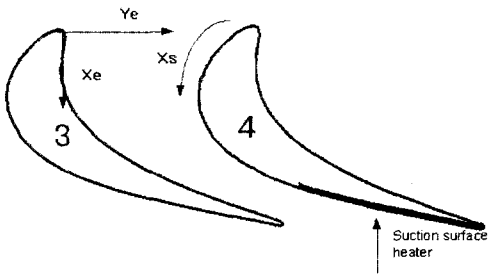

Fig 3.2 Experimental regions and coordinate systems

실린더를 설치하게 되면, 실린더가 없는 경우에 비해서 실리더 후류의 영향으로 흡입면의 뒷전 부근에 열전달이 왕성하게 일어난다. 실린더와 블레이드가 떨어진 정도가 같은 상태에서 실린더가 압력면에서 흡입면 방향으로 움직임에 따라 후류도 연동되어 움직이므로 열전달의 경향이 변하게 된다. 실린더열과 블레이드열이 멀어짐에 따라 실린더 후류가 끝벽과의 마찰로 인하여 블레이드 흡입면에 도달하기가 어려워 열전달의 정도가 작아지게 되며, 실린더가 압력면에서 흡입면으로 움직임에 따라 나타나는 열전달의 경향은 실린더열과 블레이드열의 떨어진 정도에 관계없이 후류에 의해서 St number분포가 같은 경향으로 나타났다. Fig 3.3은 실린더가 없을 때 흡입면에서의 열전달 정도를 나타내며, Fig3.4~Fig3.5는 Case_1_0, Case_1_3을 나타내고 Fig3.6~Fig 3.7은 Case_4_0, Case_4_3을 나타낸다.

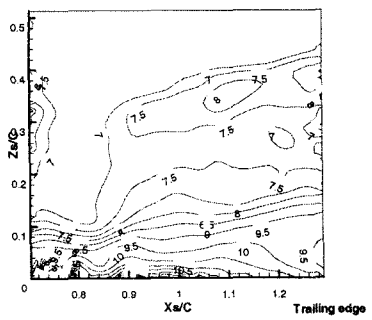

Fig 3.3 $St\times10^3$distribution on the suction surface without cylinder

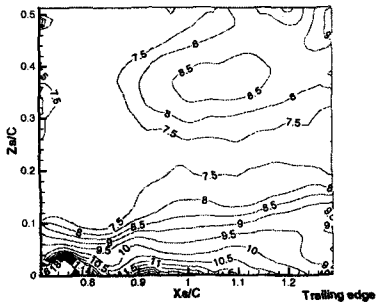

Fig 3.4 St×10^3distribution on the suction surface case_1_0

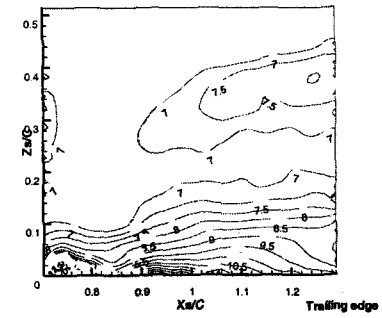

Fig 3.5 St×10^3distribution on the suction surface case_1_3

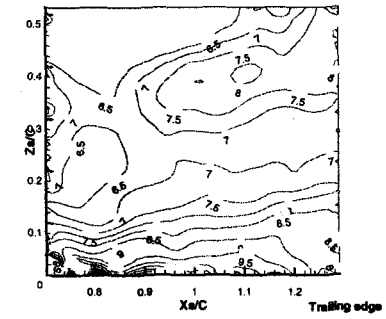

Fig 3.6 St×10^3distribution on the suction surface case_4_0

3.1.1 스팬방향의 열전달 분포

통로와류에 의하여 모든 실험경우에 대해서 끝벽으로부터 스팬방향으로 올라가면서 열전달은 줄어들고 있다. Xs/C=0.8일 때, 모든 실험경우에 대해서 실린더를 설치함에 따라 실린더가 없는경우(woc)보다 끝벽근처(Zs/C=0)에서는 열전달이 크게 나타나며, Zs/C=0.5에서는 실린더와 블레이드의 앞전을 연결한선이 만나는경우(Case_1_0, Case_2_0, Case_3_0, Case_4_0)에 가장 큰 열전달 경향을 나타내었다. 실린더열과 블레이드열이 코드길이의 4/4만큼 떨어져 있을때는 실린더의 후류가 끝벽의 마찰과 주유동에 의해서 블레이드에 도달하기가 어려워 비교적 열전달의 경향이 작게 나타났다. 뒷전부근(Xs/C=1.2)에서는 후류가 통로와류와 융합되어 여러 가지 Case에 대해서 열전달의 정도가 큰 차이를 보이지 않았다.

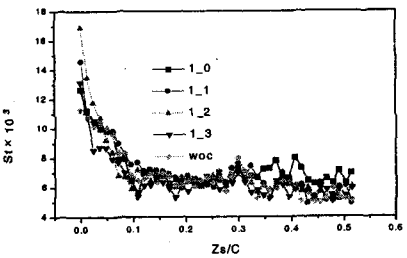

Fig 3.7 Spanwise distribution of St number on the suction surface (at Xs/C=0.8, from blade row to cylinder row is 1/4Chord)

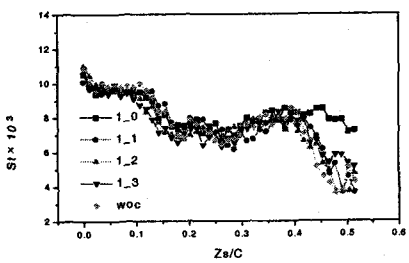

Fig 3.8 Spanwise distribution of St number on the suction surface (at Xs/C=1.2, from blade row to cylinder row is 1/4Chord)

3.2 캐스케이드 끝벽에서의 열전달 분포

실린더의 유무에 따라 큰 변화가 없었으며, 공통의 현상으로는 압력면과 흡입면 블레이드 앞전에서 유동의 정체로 인하여 열전달 현상이 국부적으로 크게 나타났으며, 통로하류에서는 유동의 확산으로인한 유속의 감소로 인하여 열전달 현상이 비교적 크게 나타났다.

통로입구(Xe/C=0)와 통로출구(Xe/C=0.77)에서는 실린더를 설치하게 되면, 실린더를 설치하지 않은 경우에 비해서 열전달이 줄어들게 된다. 이는 끝벽근처에서 실린더의 후류가 끝벽쪽으로 회전하면서 후방으로 빠져나가면서 경계층 두께를 감소시키기 때문으로 보이며, 실린더열과 블레이드열이 멀어질수록 영향력을 행사하는 길이가 길어지므로 열전달은 더욱 줄어든다.

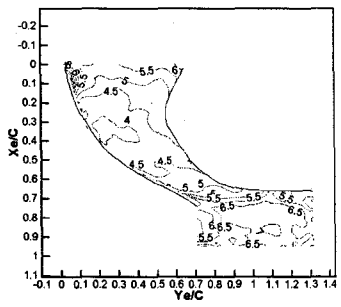

Fig 3.9 St×10^3Contours on thendwall(Case_1_0)

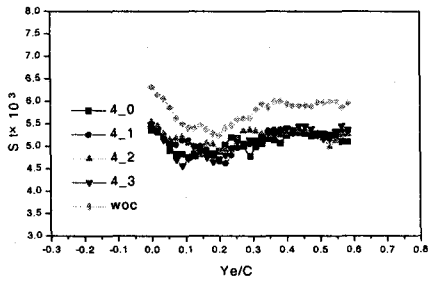

Fig 3.10 St×10^3Pitchwise distribution of St number on the endwall at Xe/C=0(Leading edge), from blade to cylinder is 4/4Chord

4. 결론

1.흡입면에서는 실린더열과 브레이드열의 거리가 멀수록 실린더의 후류가 블레이드의 흡입면에 도달하기전에 끝벽과의 마찰과 통로에서 통로와 류의 영향을 받아 후류의 효과가 상쇄되어 열전달의 정도가 줄어든다.

2.끝벽에서는 실린더를 설치하게 되면, 설치하지 않은 경우에 비해서 열전달의 정도가 줄어들며, 실린더열과 블레이드열의 거리가 멀수록 더욱 줄어든다.

참고문헌

(1) Chung, J.T., "Flow and Heat Transfer Experiments in the Turbine Airfoil/Endwall Region," ph.D. Thesis. Department of Mechanical Engineering, University of Minnesota, Minneapolis, MN.

(2) Hippensteele, S.A., Russell, L.M., 1988, "High-Resolution Liquid Crystal Heat Transfer Measurements of the End Wall of a Turbine Passage With Variations in Reynolds Number," NASA Technical Memorandum 100827.

(3) Langston, L.S., Oct. 1980, "Cross flow in a Turbine Cascade Passage," ASME Journal of Engineering for Power, Vol.102, No.4.

(4) Moore, J., and Smith, B.L., "Flow in a Turbine Cascade. Part2 Measurements of Flow Trajectories by Ethylene Detection," ASME Paper No.83-GT-69.

(5) Sieverding, C.H., 1985, "Recent Progress in the Understanding of Basic Aspects of Secondary Flows in Turbine Blade Passages", ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol.107.

(6) 곽재수, 1977, "2단 캐스케이드내에 장착된 경계층 펜스의 효과에 대한 실험적 연구", 고려대학교 기계공학과, 공학 석사 논문.

(7) 최정완, 1998,"2단 캐스케이드내 정익에 의한 후류의 영향에 관한 실험적 연구.