

비정상 후류가 선형터빈익렬의 유동 및 열전달에 미치는 영향에 관한 연구

윤순현* · 심재경** · 김동건**
(2000년 4월 6일 접수)

Influence of the Unsteady Wake on the Flow and Heat Transfer in a Linear Turbine Cascade

Soon Hyun Yoon, Jae Kyung Sim and Dong Keon Kim

Key Words : Unsteady Wake(비정상 후류), Wake Passing Frequency(후류 통과 주파수), Boundary Layer Thickness(경계층 두께), Boundary Layer Shape Factor(경계층 형상계수), Thermochromic Liquid Crystal(온도에 민감한 액정), Convective Heat Transfer(대류 열전달), Hue Capturing Method(색상 포착기법)

Abstract

The influence of unsteady wake on the flow and heat transfer characteristics in a four-vane linear cascade was experimentally investigated. The unsteady wake was generated with four rotating rectangular plates located upstream of the cascade. Tested inlet Reynolds number based on chord length was set to 66,000 by controlling free-stream velocity. A hot-wire anemometer system was employed to measure turbulent velocity components. For the convective heat transfer coefficients measurement on turbine blade surface, thermochromic liquid crystal and gold film Intrex were used. It was found that the unsteady wake enhances the turbulent motion in the cascade passage and accordingly promotes the development and transition of boundary layer. It was found that the heat transfer coefficients on the blade surface increase as the plate rotating speed increases. However, the increasing of heat transfer coefficients is not significant in the case that Strouhal number is higher than 0.503.

기호설명

B : 액정이 도포된 표면적 [m^2]
 C : 블레이드 현의 길이 [m]
 E : 측정표면에 공급된 전압 [V]
 f : 사각주의 회전 주파수 [Hz]
 h : 대류 열전달 계수 [$W/m^2 \cdot K$]
 I : 금박막에 공급되는 전류 [A]
 k : 공기의 열전도도
 N : 흡입면에 수직한 방향 좌표
 Nu : Nusselt 수 (hC/k)
 \overline{Nu} : 평균 Nusselt 수

q'' : 열유속(heat flux) [W/m^2]
 Re : Reynolds 수
 S : 블레이드 표면 상의 좌표
 St : Strouhal 수 ($2\pi f C / U_\infty$)
 T_w : 블레이드의 표면 온도 [$^\circ C$]
 T_∞ : 자유흐름의 온도 [$^\circ C$]
 T_a : 외기 온도 [$^\circ C$]
 Tu : 난류 강도 ($\sqrt{\overline{v'^2}} / U_\infty \times 100$)
 U_∞ : 자유흐름의 유속 [m/s]
 V : 순간 유속 [m/s]
 \hat{v} : 주기적 유속 성분 [m/s]
 v' : 순간 유속 섭동 [m/s]
 X : 축방향 좌표
 Y : 피치방향 좌표

* 회원, 부산대학교 기계공학부
 E-mail : yshyoon@hyowon.pusan.ac.kr
 TEL : (051)510-2314 FAX : (051)583-4140
 ** 회원, 부산대학교 기계기술연구소

1. 서론

가스터빈의 출력 및 효율증대를 위해서는 고온의 작동가스가 필수적이며, 특히 터빈 블레이드는 고온의 가스유동으로 인한 기계적 성능의 저하가 발생하므로, 유동 및 열전달의 분포의 예측과 그에 따른 적절한 냉각은 가스터빈 기관의 설계에 필수적이다.

익렬에 유입되는 유동은 높은 난류 강도를 가짐과 동시에 불균일하고, 비정상적인 흐름으로 구성되며, 이는 주로 정익과 동익의 상호간섭으로 인하여 발생한다. 비정상 유동은 블레이드 표면에서의 대류열전달 계수를 증가시킨다. 압력면에서의 대류열전달 계수의 증가는 익렬 내부 유동의 난류 혼합의 증가에 주로 영향을 받으며, 흡입면에서는 경계층의 발달 및 천이에 영향을 받는다.

비정상 후류의 영향을 받는 경계층 천이 현상에 관한 모델은 여러 연구자들에 의하여 제시되었다. Pfeil 등⁽¹⁾은 비정상 후류의 영향을 받는 평판 경계층의 천이현상을 실험적으로 연구하였으며, 이에 대한 천이 예측 모델을 제시하였다.

Mayle 등⁽²⁾은 정상상태에서의 시간평균 열전달 계수와 간헐도를 사용하여, 블레이드 흡입면에서 대류 열전달 계수를 구하는 식을 제시하였다. 그러나 이는 후류의 주파수를 효과적으로 고려하지 못하며, 특히 높은 주파수의 후류에서 잘 맞지 않는다. LaGraff 등⁽³⁾은 열전달 측정을 통하여 비정상 후류에 의한 난류의 전파속도를 구하였다. Funazaki⁽⁴⁻⁵⁾는 높은 주파수의 후류를 효과적으로 고려할 수 있는 모델을 제시하였다. 그러나 대부분의 천이 예측 모델은 평판 경계층에서의 실험 결과를 근거로 하였으며, 따라서 블레이드와 같은 곡면에서의 경계층에 대하여 실험 자료를 통한 검증이 필요하다.

일반적으로 비정상 후류는 자유흐름에 주기적인 교란을 가함으로 발생시킨다. LaGraff 등은⁽³⁾ 회전판에 방사형으로 원형실린더를 부착하여 흐름에 수직인 방향으로 회전시킴으로서 비정상 후류를 생성하였다(spoke wheel type). Dong 등⁽⁶⁾은 수직인 방향으로 설치된 실린더를 체인을 사용하여 구동함으로써 비정상 후류를 생성하였으며(moving bar chain type), Liu 등⁽⁷⁾은 두 회전판의 원주부분에 유동에 수직인 방향으로 실린더를

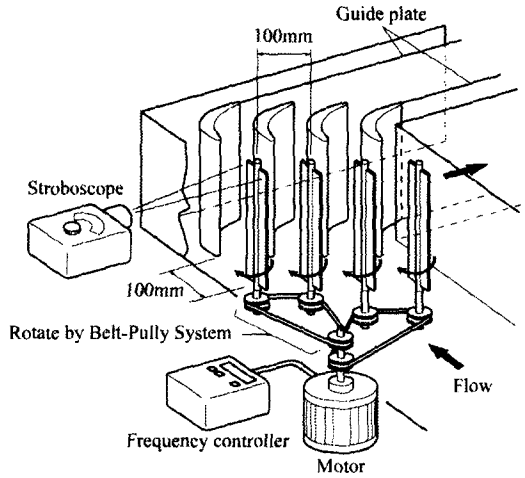


Fig. 1 Schematic of experimental setup

Table 1 Cascade geometric data

Span	300 mm
Chord(C)	100 mm
Pitch	100 mm
Pitch/chord	1
Aspect ratio	3
Blade inlet angle	48.9°
Blade outlet angle	-63.5°

부착한 다람쥐장 형태의 후류 발생기를 사용하였다(squirrel cage type). 이와 같은 방식의 후류발생 장치는 동익과 정익의 상대운동으로 인한 비정상 유동과 뒷전에서의 박리 등과 같은 터빈 익렬에서의 복잡한 유동을 비교적 성공적으로 모사하고 있다. 그러나 높은 난류강도, 뒷전에서의 박리, 주기적 교란 등의 유동 인자에 의한 영향을 개별적으로 파악하기가 어려우므로 경계층 및 익렬 내부 유동에 대한 모델링이 힘들다.

윤순현 등^(8,9)은 터빈 익렬에 유입되는 자유흐름의 조건을 변화시켜, 여러 가지 유동인자의 영향을 개별적으로 파악하는 일련의 연구를 수행하였다. 격자를 사용하여 자유흐름의 난류강도를 증가시켜 증가된 난류강도가 흡입면의 경계층 발달과 구조적 변화를 유발함을 보였고 익렬의 도입부에 사각주를 설치하여, 사각주 후류로 인한 자유흐름의 교란이 블레이드 표면의 경계층 발달을 촉진하고, 특히 흡입면에서의 대류열전달을 획기적으로 증가시키는 것을 밝혔다.

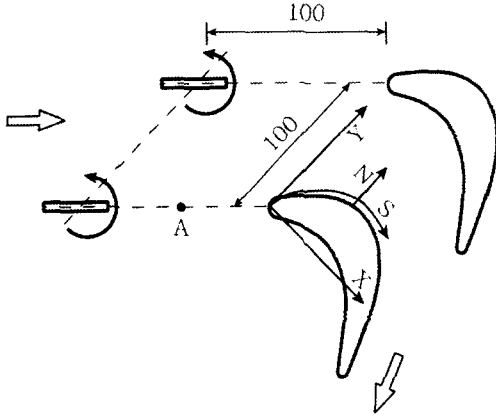


Fig. 2 Coordinate system and test section

본 연구에서는 익렬의 도입부에 사각판을 설치하여 이를 회전시켜 비정상 후류를 생성시키고, 유로의 폐쇄비를 변화시킴으로써 자유흐름의 맥동을 발생시켰다. 이를 통한 블레이드 표면에서의 경계층과 대류열전달 계수를 측정하였다.

2. 실험장치 및 방법

실험에 사용된 풍동은 개방형 저속풍동으로, 유량이 3 m³/s, 압력상승은 0.786 kPa이며, 노즐 출구에서의 난류강도는 0.6%이다. 시험부는 0.3 m × 0.3 m의 크기를 가지며, 벽면은 투명아크릴로 제작하였다. 익렬은 4개의 블레이드로 구성되며, 현의 길이와 자유흐름의 속도에 근거한 Reynolds 수는 66,000이다. 블레이드 사이의 간격은 0.1 m, 블레이드의 높이는 0.3 m로 하여 측정단면에서의 2차원성을 확보하였다. 실험에 사용된 블레이드는 저압용 터빈의 동익에서 중앙단면(midspan)의 형상을 취하여 선형 익렬을 구성하였다. Table 1에서 익렬변수들을 정리하였다.

본 연구에서는 익렬의 도입부에 4개의 사각판을 설치하고, 이를 벨트-풀리 장치로 회전시켜 맥동 성분을 가지는 비정상 후류를 발생시켰다. 사각판은 두께 5 mm, 폭 50 mm, 길이는 300 mm의 아크릴로 제작되었으며, 각 사각판은 익렬의 앞전으로부터 100 mm 전방에 위치한다. 사각판의 회전수는 전원주파수 조절장치를 통하여 조절하였으며, 스트로보스코프를 사용하여 회전수를

Table 2 Experimental cases

Case	Rotation speed (RPM)	Strouhal number (St)
1	0	-
2	60	0.126
3	240	0.503
4	360	0.754
5	480	1.005

측정하였다. 실험 경우는 사각판의 회전수에 따라 결정하였으며, 사각판의 회전주파수를 f 로 하였을 때 이를 Strouhal 수로 무차원화 하여 표시하였다. Table 2에서 각 실험 경우의 회전수와 Strouhal 수를 나타내었다.

$$St = \frac{2\pi fC}{U_\infty} \quad (1)$$

Fig. 2에서 보인 바와 같이 익렬의 축방향 좌표를 X , 축에 수직 방향을 Y 로 정의하고, 블레이드의 표면을 따라가는 좌표를 S , 이에 수직인 좌표를 N 으로 하였다.

유동장의 측정을 위하여 정은 열선 유속계(IFA300, TSI)를 사용하였으며, 후류 발생기에 유입되는 자유흐름의 유속은 피토판을 사용하여 측정하였다. 흡입면의 경계층 속도 분포를 I형 열선(TSI, 1210-T1.5)를 사용하여 측정하였다. 열선으로부터의 신호는 A/D변환기를 거쳐 컴퓨터에 저장하였다.

열선을 통한 속도 신호는 조건부 자료추출(conditional sampling)을 통하여 시간평균 속도와 사각판의 회전주기에 해당하는 주기적인 저주파 성분, 난류 섭동 성분으로 분리하여 분석하였다.

$$V \approx \bar{V} + \hat{v} + v' \quad (2)$$

$$\hat{v}(t_j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_i(t_j), \quad n = 360 \quad (3)$$

$$v'(t_j) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [V_i(t_j) - \hat{v}(t_j)]^2 \quad (4)$$

$$Tu(t_j) = \frac{\sqrt{v'^2(t_j)}}{U_\infty} \times 100 \quad (5)$$

조건부 자료추출을 위한 기준 신호는 사각판의 회전으로 발생하는 주기적인 속도변화로 하였

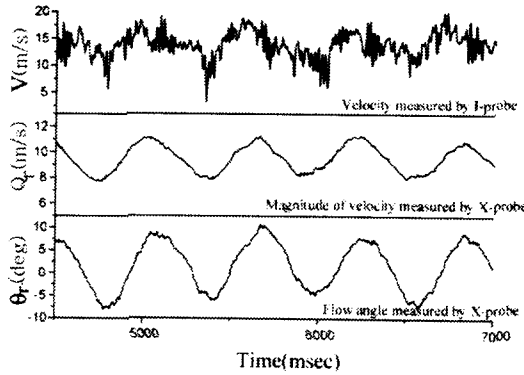


Fig. 3 Instantaneous velocity and reference signal

으며, 이를 측정하기 위하여 사각관의 회전 중심에서 50 mm 떨어진 위치(A, Fig. 2)에 X형 열선(TSI, 1240-T1.5)을 설치하여 속도신호를 획득하였다. Fig. 3에서 흡입면의 경계층에서 속도신호와 조건부 자료추출을 위한 기준신호를 나타내었다.

흡입면과 압력면에서 대류 열전달 계수를 구하기 위하여 온도에 민감한 액정(thermochromic liquid crystal)을 사용하여 블레이드 표면의 온도를 측정하였다. 색상과 온도의 상관 관계는 열전대를 이용한 보정 실험을 통하여 구하였다. 또한 측정 표면에 미세한 금입자가 도포된 폴리에스터 필름(gold film Intrex)을 부착하여 전기적으로 일정한 열유속을 공급하여 등열유속(constant heat flux)경계조건을 설정하였다. 국소 대류열전달 계수는 공급된 열량과(q'') 액정을 통하여 획득된 표면온도(T_W)와 자유흐름의 온도(T_∞)를 통하여 계산하였다.

$$h = \frac{q''}{T_W - T_\infty} \quad (6)$$

$$q'' = \frac{f(I \cdot E)}{A} - q_{rad}'' - q_{cond}'' \quad (7)$$

$$Nu = \frac{hC}{k} \quad (8)$$

윤순현 등^[10]에 의하면 측정면의 곡률이 액정의 색상값(hue)에 큰 영향을 주는 것으로 알려져 있으며, 따라서 블레이드의 곡률과 측정 각도를

Table 3 Nusselt number uncertainty analysis

x_i	Unit	Value	δx_i	$\frac{\delta x_i}{Nu}$	$\frac{\partial Nu}{\partial x_i}$ (%)
f		1.0	0.02		2.60
T_W	[°C]	35.6	0.2		3.66
T_∞	[°C]	28.79	0.14		2.23
E	[V]	21.32	0.125		3.41
I	[A]	0.355	5×10^{-3}		0.02
C	[m]	0.1	5×10^{-5}		0.05
ϵ		0.9	0.05		0.73
A	[m ²]	0.008	5×10^{-5}		0.7
T_a	[°C]	25.1	0.14		0.19

$$\text{Total Nu uncertainty : } \frac{\delta Nu}{Nu} = 6.19 \%$$

고려하여 색상값을 보정하였다. 대류 열전달 계수는 Nusselt 수로 나타내었으며 Table 3에서 측정된 대류 열전달 계수의 불확실도를 Kline 등^[11]이 제시한 방법으로 해석하여 나타내었다. 측정각도의 보정작업으로 인하여 온도값의 측정오차가 증가하였으며, 그 외에 전압값과 금박막의 도금 균일도도 측정오차 증가의 큰 부분을 차지하였다.

3. 실험 결과

사각주의 회전으로 인한 비정상 후류는 익렬 통로 내부의 유동을 주기적으로 교란하여 난류강도를 증가시킨다. 특히 경계층의 난류강도는 블레이드 표면의 대류 열전달을 증가시키므로, 흡입면에 인접한 영역의 난류강도를 Fig. 4에서 나타내었다. 후류의 영향이 존재하지 않는 정상상태(case 1)에서는 경계층에서의 난류강도는 최대 3%정도로 비교적 낮게 나타났으며, $N < 0.6$ 의 좁은 구간에서 분포하고 있다. 비정상 후류가 존재하는 경우는(case 2~5) 후류로 인한 혼합의 증가로 인하여 전체 경계층 영역의 난류강도가 증가하여, 정상 상태에서와 달리 경계층 외부의 난류강도가 3%로 증가한다. S/C가 커질수록 난류강도는 증가하게 되고 S/C ≈ 0.5 지점에서 급격한 증가를 보인다. 따라서 이 지점에서 경계층의 변

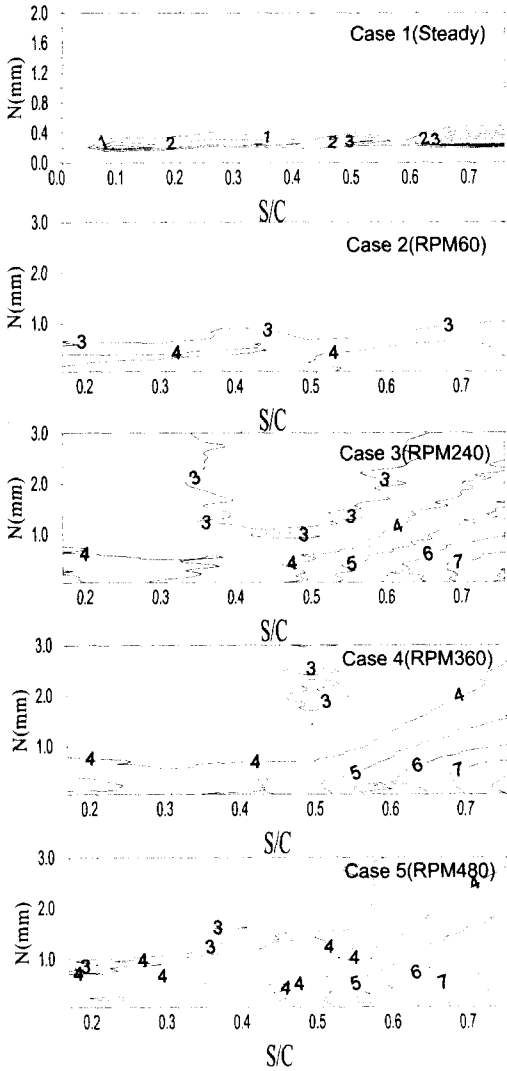


Fig. 4 Turbulence intensity distribution on the suction surface

화가 발생하고 있음을 유추할 수 있다. 또한 이러한 경계층 변화의 위치도 미미하지만 Strouhal 수의 증가에 따라 앞쪽으로 이동하고 있다.

블레이드 흡입면에서의 경계층 두께를 Fig. 5에서 나타내었다. 앞전의 정체점에서부터 경계층이 발달하여 $0.1 < S/C < 0.3$ 의 영역에서 경계층 두께가 급격한 증가를 보이다가 다시 감소하여 $0.4 < S/C < 0.5$ 의 영역에서 최소값을 보이고 다시 증가한다. 비정상 후류의 영향으로 인하여 경계층의 두께는 증가하며, 특히 $S/C > 0.35$ 이후에서

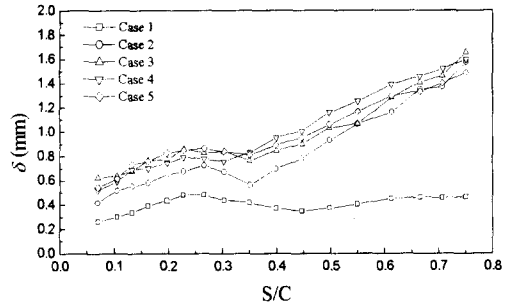


Fig. 5 Boundary layer thickness in the suction surface

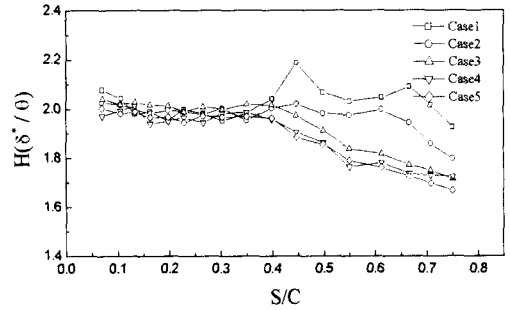


Fig. 6 Boundary layer shape factor in the suction surface

급격하게 증가하고 있다. 이와 같은 급격한 증가 현상은 후류로 인한 난류강도 증가와 사각판의 회전에 따른 유동의 맥동 현상의 영향이 복합적으로 작용한 것으로 보인다. 그러나 $St \geq 0.503$ 인 경우에는 경계층 두께의 변화가 크게 나타나지 않았다.

Fig. 6은 경계층 형상계수를 나타내었다. 모든 측정구간에서 형상 계수의 값이 2.4 이하이므로 흡입면에서 유동의 박리는 발생하지 않는다는 것을 알 수 있다. 또한 Liu 등⁽¹²⁾에 의하면 일반적으로 형상계수의 값이 층류경계층에서는 2.0, 난류경계층에서는 1.5 정도의 값을 가진다고 하였다. 본 실험에서 후류가 없는 경우에는 전체 측정 영역에서 2.0 근처의 값을 보이므로 측정 구간 내에서 경계층 천이가 발생하지 않았다는 것을 유추할 수 있다. 그러나 후류가 존재하는 경우에는 형상계수가 전반적으로 후류가 없는 경우보다 낮은 값을 보이며, 특히 $S/C > 0.6$ 의 영역

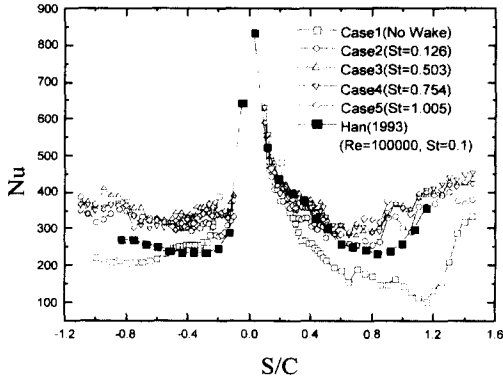


Fig. 7 Nusselt number distribution on the blade surface

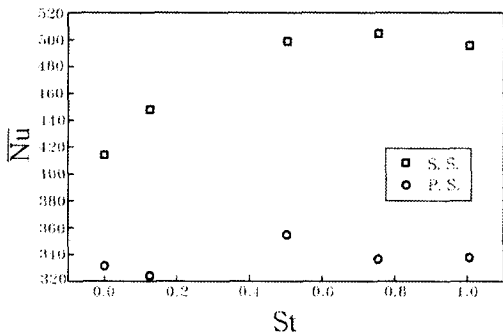


Fig. 8 Mean Nusselt number with variation of Strouhal number

에서는 형상계수가 급격히 감소하여 1.5 이하의 값을 보인다. 이것은 후류의 교란으로 인하여 경계층이 층류에서 난류로 천이되었다는 것을 의미하며 이로 인한 열전달의 증가를 예측할 수 있다. 또한 Strouhal 수의 증가에 따라 형상계수의 감소 지점이 상류로 이동하는 것을 볼 수 있으며, 따라서 천이 발생 지점이 상류로 이동할 것으로 예측된다.

Fig. 7에서는 각 실험경우의 블레이드 표면에서 대류열전달 계수를 나타내었다. 후류의 영향으로 인하여 대류열전달 계수는 전반적으로 증가하였으며, 특히 압력면보다 흡입면에서 확연하게 증가하는 것을 볼 수 있다. 압력면에서의 후류는 단순한 혼합의 증가에 그치지만 흡입면에서는 혼합의 증가 이외에도 경계층의 천이와 같은 유동 구조의 변화를 유발하므로 흡입면에서 후류의 영

향이 더욱 크고, 이에 따라 대류 열전달 계수의 증가도 흡입면에서 더욱 뚜렷하다.

Fig. 8에서 평균 대류열전달 계수를 나타내었다. 평균 대류열전달 계수는 식 (9)과 같이 정의하였다. 여기서 S_s 와 S_e 열전달계수 측정의 시작과 끝지점의 좌표이다. 비정상 후류의 영향으로 블레이드 표면에서 평균 대류 열전달 계수는 증가한다. 그러나 압력면에서의 증가는 그리 크지 않으며, 흡입면에서 뚜렷한 증가를 나타낸다. 그러나 $St > 0.5$ 의 구간에서는 거의 일정하게 나타났다.

$$\overline{Nu} = \frac{\int_{S_s}^{S_e} Nu dS}{S_e - S_s} \quad (9)$$

4. 결론

본 연구는 2차원 터빈 익렬에서 맥동을 가지는 비정상 후류가 유동 및 대류열전달에 미치는 영향을 실험적으로 연구하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

비정상 후류는 혼합을 증가시켜 경계층에서의 난류강도를 증가시킨다. Strouhal 수의 증가에 따라 흡입면에서의 난류강도가 최대 8.5%까지 증가하였다.

비정상 후류는 경계층의 발달을 촉진하여 흡입면에서의 경계층 두께가 크게 증가하였으며, 형상계수를 통하여 Strouhal 수의 증가에 따라 경계층 천이 지점이 상류방향으로 이동하는 것을 확인하였다.

비정상 후류의 영향으로 흡입면에서의 대류열전달계수가 증가하였으며, $S/C = 0.6$ 이후에서 급격한 증가를 보였다. 그러나 Strouhal 수가 0.503 이상인 경우에는 평균 대류열전달 계수의 증가가 나타나지 않았다.

후기

본 연구는 학술진흥재단에서 지원하는 1998년도 기계공학과에 의해 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Pfeil, H., Herbst, R., and Schroder, T., 1983, "Investigation of the Laminar-Turbulent Transition of Boundary Layers Disturbed by Wakes," *Journal of Engineering for Power*, Vol. 105, pp. 130~137.
- (2) Mayle, R. E., and Dullenkopf, K., 1988, "More on the Turbulent-Strip Theory for Wake-Induced Transition," *Journal of Turbomachinery*, Vol. 113, pp. 428~432.
- (3) LaGraff, J., Ashworth, D. A. and Schultz, D. L., 1988, "Measurement and Modelling of the Gas Turbine Blade Transition Process as Disturbed by Wakes," *ASME Paper* 88-GT-232.
- (4) Funazaki, K., 1996, "Unsteady Boundary Layers on a Flat Plate Disturbed by Periodic Wakes: Part I - Measurements of Wake-Affected Heat Transfer and Wake-Induced Transition Model," *Journal of Turbomachinery*, Vol. 118, pp. 327~336.
- (5) Funazaki, K., 1996, "Unsteady Boundary Layers on a Flat Plate Disturbed by Periodic Wakes: Part II - Measurements of Unsteady Boundary Layers and Discussion," *Journal of Turbomachinery*, Vol. 118, pp. 337~346.
- (6) Dong, Y. and Cumpsty, N. A., 1989, "Compressor Blade Boundary Layers: Part I - Test Facility and Measurements with No Incident Wakes," *ASME Paper* 89-GT-50.
- (7) Liu, X., and Rodi, W., 1991, "Experiments on Transitional Boundary Layers with Wake-Induced Unsteadiness," *Journal of Fluid Mech.*, Vol. 231, pp. 229~256.
- (8) 이대회, 심재경, 박성봉, 이재호, 윤순현, 1998, "터빈 블레이드 표면과 선형익렬에서의 열전달 및 유동 측정 연구," 대한기계학회논문집, 제23권, 제5호, pp. 567~576.
- (9) 윤순현, 심재경, 우창수, 이대회, 1999, "사각주 후류가 선형터빈익렬의 유동 및 열전달에 미치는 영향에 관한 연구," 대한기계학회논문집, 제23권, 제7호, pp. 864~870.
- (10) 윤순현, 심재경, 우창수, 2000, "측정각도를 고려한 액정교정기법의 개선," 대한기계학회 논문집, 제24권, 제2호, pp. 188~194.
- (11) Kline, S. J., and McClintock, F. A., 1953, "Describing Uncertainties in Single Sample Experiments," *Mech. Engr.*, Vol. 5, pp. 3~8.
- (12) Liu, X. and Rodi, W., 1994, "Velocity Measurements of Wake-Induced Unsteady Flow in a Linear Turbine Cascade," *Experiments in Fluids*, Vol. 17, pp. 45~58.
- (13) Han, J. C., Zhang, L. and Ou, S., 1993, "Influence of Unsteady Wake on Heat Transfer Coefficient From a Gas Turbine Blade," *Journal of Heat Transfer*, Vol. 115, pp. 904~911.