사각주 후류가 선형터빈익렬의 유동 및 열전달에 미치는 영향에 관한 연구

윤순현* · 심재경** · 우창수** · 이대희***
(1998년 11월 27일 접수)

Influence of the Wake Behind Rectangular Bars on the Flow and Heat Transfer in the Linear Turbine Cascade

Soon Hyun Yoon, Jae Kyung Sim, Chang Soo Woo and Dae Hee Lee

Key Words : Wake Behind Rectangular Bar(사각주 후류), Unsteadiness(비정상도), 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

An experimental study is conducted in a four-vane linear cascade in order to examine the influence of the wake behind rectangular bars on the flow and heat transfer characteristics. Flow and heat transfer measurements are made for the inlet Reynolds number of 66000(based on chord length and free-stream velocity). Turbulent intensity and stress are measured using a hot-wire anemometer, and to measure the convective heat transfer coefficients on the blade surface liquid crystal/gold film Intrex technique is used. Each of experimental cases is characterized by the unsteadiness measured at the entrance of the cascade. The wake behind the rectangular bars enhances the turbulent motion of the flow in the cascade passage. It also promotes the boundary layer development and transition. The results show that heat transfer coefficients on the blade surface increase with increasing unsteadiness.

기호설명

A : 액정이 도포된 표면적
C : 블레이드 현의 길이
E : 섭동 속도의 에너지 스펙트럼
f : 섭동 속도의 주파수
f_d : 사각주 후류의 지배 주파수
h : 대류 열전달 계수
I : 금박막에 공급되는 전류
k : 공기의 열전도도
Nu : Nusselt 수(hC/k)
P : 블레이드 사이의 간격(pitch)
q" : 열유속(heat flux)
Re : Reynolds 수
s : 블레이드의 높이(span)
S : 블레이드 표면상의 좌표
St : Strouhal 수(f_dC/U_o)
T_w : 블레이드의 표면온도
T_∞ : 자유흐름의 온도
Tu_r : 자유흐름의 온도
U_o : 자유흐름의 유속
U, V : X, Y방향의 순간 유속
u, v : X, Y방향의 섭동 속도
X : 익렬의 축방향 좌표
Y : 익렬의 피치방향 좌표

* 회원, 부산대학교 기계공학부
** 부산대학교 대학원 기계공학과
*** 회원, 인제 대학교 기계· 자동차공학부

1. 서 론

가스터빈의 출력 및 효율증대를 위해서는 고온의 작동가스가 필수적이며, 따라서 터빈 구성요소의 냉각기법의 확보는 터빈의 설계에 있어서 매우 중요하다. 특히 터빈 블레이드는 고온의 가스유동으로 인한 기계적 성능의 저하가 발생하므로, 유동 및 열전달의 분포의 예측을 통하여 적절한 냉각과 수명예측은 가스터빈 기관의 설계에 필수적이다. 그러므로 선형익렬을 통하여 유동 및 열전달 현상을 실험적으로 규명하는 것은 블레이드 표면에서의 온도분포의 예측과 익렬의 구성요소에 대한 냉각성능 예측을 위하여 선행되어야 할 과제이다.

터빈 익렬에 유입되는 유동은 매우 높은 난류강도를 가지며, 이를 실험적으로 구성하기 위하여 다양한 크기의 난류격자(turbulence grid)를 주로 사용하였다.[1,2] 그러나 실제의 터빈익렬에서는 정익과 동익의 상호간섭으로 인하여 공간적으로 불균일하고, 비정상적인 후류가 발생하며 이는 난류격자를 통하여 고려될 수 없다. 이와 같은 비정상 효과는 경계층의 천이를 촉진하여 대류열전달을 향상시킨다.[3~5] 비정상 후류에 의한 효과를 고려하기 위하여 살이 달린 바퀴(spoke wheel) 또는 체인에 의하여 움직이는 막대(moving bar chain)등을 사용하였다.[6,7] 그러나 이와 같은 유동은 익렬의 상대 운동으로 인한 주기적인 교란, 뒷전에서의 박리, 다양한 와동 등의 많은 형태의 유동이 중첩되어 있으므로 명확한 현상 규명이 힘들다.

본 연구에서는 익렬의 도입부에 고정된 사각주를 설치하여, 익렬의 상대운동으로 인한 주기적인 교란을 배제하고, 사각주 후류가 익렬의 유동 및 열전달에 미치는 영향을 연구하였다. 블레이드의 회전으로 인한 비정상 유동과 뒷전(trailing edge)의 유동 박리로 인한 영향을 나누어 연구함으로써 익렬 내부의 유동특성이 대류열전달에 미치는 영향에 대한 보다 상세한 이해를 도모하였다.

2. 실험장치 및 방법

실험에 사용된 풍동은 개방형 저속풍동으로 유

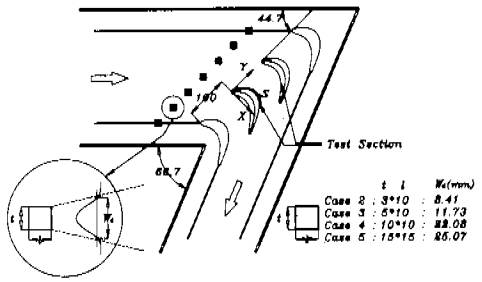


Fig. 1 Schematic diagram of the turbine blade and cascade.

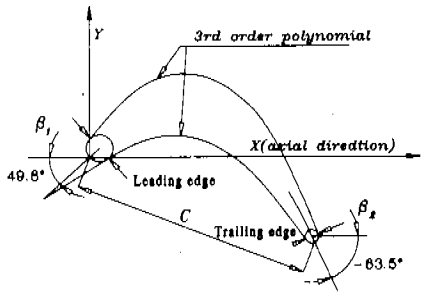


Fig. 2 Blade profile and parameters.

Table 1 Cascade geometric data.

Span(s)	300 mm
Chord(C)	100 mm
Pitch(P)	100 mm
Aspect ratio(s/C)	3
Blade inlet angle(β_1)	48.9°
Blade outlet angle(β_2)	-63.5°
Leading edge diameter	5.82 mm
Trailing edge diameter	2.91 mm
Suction surface $Y=43.345+2.975X - 0.1X^2+0.00174X^3$	
Pressure surface $Y=-29.541+1.171X - 0.029X^2+0.0024X^3$	

량이 3 m^3/s, 압력상승은 0.786 kPa이며, 자유흐름의 속도는 10 m/s이고, 난류강도는 0.6%이다. 시험부는 0.3 m × 0.3 m의 크기를 가지며 벽면은 투명아크릴로 제작하여 유동 및 온도장의 가시화를 용이하게 하였다. 익렬은 4개의 블레이드로 구성되며, 현의 길이와 자유흐름의 속도에 근거

한 Reynolds 수는 66000이다. 블레이드 사이의 간격 P는 0.1 m, 블레이드의 높이 s는 0.3 m로 하여 측정단면에서의 2차원성을 확보하였다.

익렬의 축방향 좌표를 X, 축에 수직 방향을 Y, 블레이드의 표면을 따라가는 좌표를 S로 정의하고, 블레이드 앞전(leading edge)의 정체점을 좌표계의 원점으로 하였다(Fig. 1). 실험에 사용된 블레이드는 일단 터빈의 동익의 중앙단면(midspan)의 형상을 취하여 선형익렬을 구성하였다.[8] Fig. 2에 블레이드의 형상을 나타내었으며, Table 1에서 익렬변수들을 정리하였다.

비정상후류는 익렬의 앞전에서 100 mm 떨어진 지점에 설치된 고정된 사각주를 통하여 생성되며, 사각주의 두께는 3, 5, 10, 15 mm 이다. 익렬 내부의 유동에서 축방향 속도성분을 U, 피치방향 속도성분을 V로 하며, 각각의 섭동속도를 u, v로 나타낸다. 그러나 익렬 통로에서는 익렬의 곡률을 따라 유동각이 변화하므로 익렬의 도입부에서 정의되었던 좌표가 큰 의미를 가지지 않는다. 이로 인해 Zaccaria 등[9]은 식(1)로 정의되는 비정상도를 도입하여 노즐에서 발생하는 후류가 미치는 영향을 고려하였다. 따라서 본 연구에서도 이러한 비정상도를 통하여 사각주의 후류가 통로내부의 유동에 미치는 영향을 평가하였다.

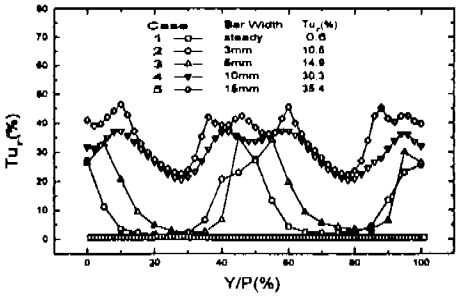


Fig. 3 Unsteadiness distribution at the entrance of cascade.

Table 2 Experimental cases.

Case	Bar thickness (mm)	Unsteadiness Tu_r(%)	Dominant Frequency(Hz)
1	-	0.6	-
2	3	10.5	-
3	5	14.9	-
4	10	30.3	141
5	15	35.4	260

$$Tu_r = \sqrt{\overline{u^2}+\overline{v^2}}/U_0 \times 100(\%) \quad (1)$$

실험조건은 앞전에서 65 mm 떨어진 지점(X=-46.4 mm)에서 측정하였다. 각각의 경우에서 Y방향으로 2번 익형의 앞전에서 3번 익형의 앞전까지(Y=0~P) 일정한 간격으로 측정하여 Fig. 3에서 나타내었으며, 그 평균값을 Table 2에서 나타내었다.

유동장의 측정을 위하여 정온열선유속계(TSI, IFA300)를 사용하였으며, 후류 발생기에 유입되는 자유흐름의 유속은 피토관을 사용하여 측정하였다. 익렬통로에서는 X형 열선을 사용하여 측정하였고, 흡입면에서의 경계층 속도분포는 I형 열선을 사용하여 측정하였다. X형 열선의 보정에는 유입각의 검출성능이 뛰어난 교정도표기법(look-up table method)를 사용하였다.[10] 또한 통로 내부에서는 블레이드를 따라 휘어지는 유동을 효과적으로 측정하기 위하여 흐름의 방향에 따라 최적의 측정각을 결정하여 유동을 측정하였다. 열선으로부터의 신호는 A/D변환기를 거쳐 컴퓨터에 저장하였으며, 신호 검출 간격은 0.0001초이고 8192개의 자료를 50회 앙상블을 취하였다.

흡입면과 압력면에서 대류열전달 계수를 구하기 위하여 온도에 민감한 액정(thermochromic liquid crystal)을 사용하여 블레이드 표면의 온도를 측정하였다. 색상과 온도의 상관관계는 열전대를 이용한 보정실험을 통하여 구하였다. 또한 측정표면에 미세한 금입자가 도포된 폴리에스터 필름(gold film Intrex)을 부착하여 전기적으로 일정한 열유속을 공급하여 등열유속(constant heat flux)경계조건을 설정하였다.[11]

3. 실험결과

사각주를 지나는 자유흐름은 사각주의 표면에서 주기적으로 박리 되므로, 속도성분의 주파수 역 측정을 통하여 유동의 주기성을 확인할 수 있다. Fig. 4에서 섭동속도의 에너지 스펙트럼을 나타내었다. 에너지 스펙트럼은 익렬통로의 평균선(mean line)을 따라 유속을 측정하였으며, 측정시간을 충분히 길게 하여 다양한 스케일의 흐름을 포착할 수 있도록 하였다. 사각주 후류가 가지는

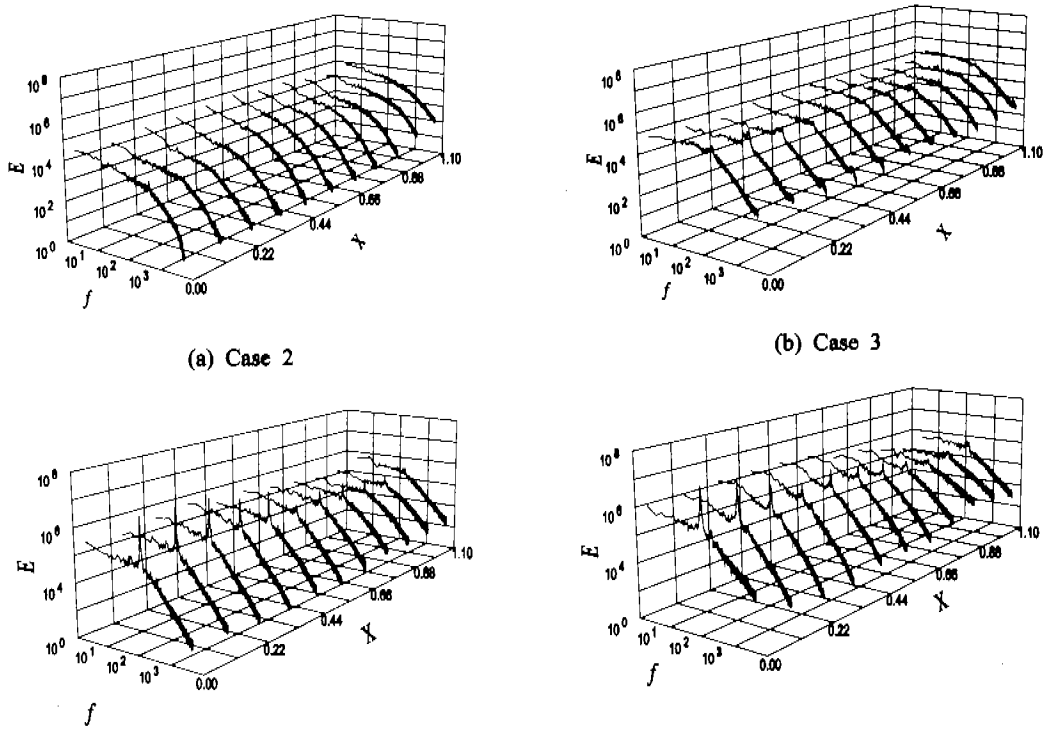


Fig. 4 Power spectrum of fluctuation velocity along the mean line.

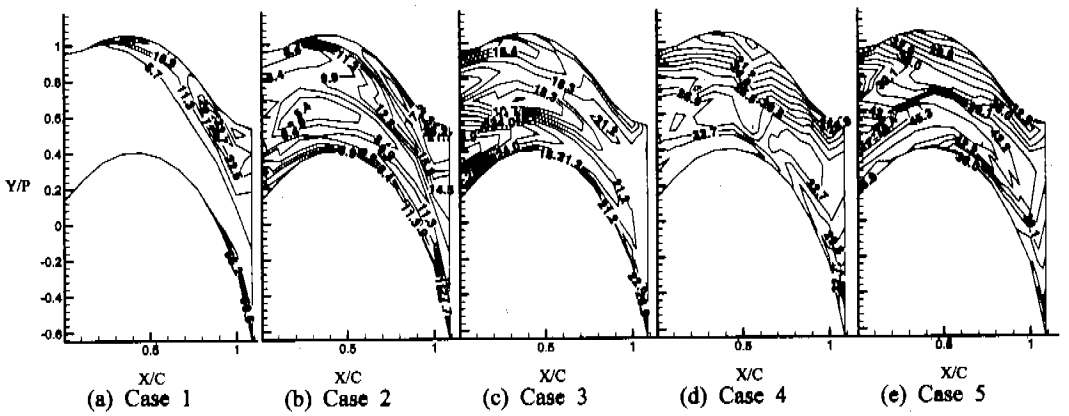


Fig. 5 Unsteadiness distribution in the cascade passage.

주기성을 Strouhal 수로 나타내었다. Strouhal 수는 익렬에 유입되는 자유흐름의 유속과 지배 주파수 (f_d)로 식(2)와 같이 정의하였다.

$$St = \frac{f_d C}{U_o} \tag{2}$$

실험 경우 1, 2, 3에서는 후류의 영향이 충분히 하류로 전달되지 못하므로 특정한 주파수에서 피

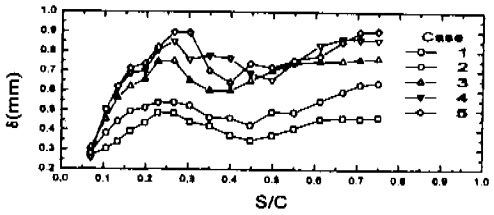


Fig. 6 Boundary layer thickness on the suction surface.

크값을 나타내지 않는다. 그러나 실험 경우 4, 5 외 경우에서는 약 120 Hz 근처의 주파수에서 피크값을 나타내며 후류의 영향이 하류로 전달된다. 와의 유출로 인한 지배주파수의 영향은 익렬 외 도입부에서 뚜렷하게 나타나며 통로를 지나 하류로 갈수록 미약해진다.

사각주로 인한 후류는 통로내부의 유동을 교란시켜 비정상도를 증가시킨다. Fig. 5에서 통로내부의 비정상도가 각주의 두께에 따라 증가함을 알 수 있다. 익렬의 도입부에서는 후류의 영향으로 인하여 비정상도가 증가하며, 뒷전 영역으로 갈수록 후류의 영향은 상대적으로 적어지고, 통로내부의 다양한 와동으로 인한 난류성분의 영향이 커진다. 그리고 압력면에서는 앞전에서 발생하는 와류로 인하여 높은 비정상도를 보이고 있으며, 따라서 후류로 인한 비정상도의 증가가 흡입면에 비하여 미약하다. 특히 익렬의 뒷전에서의 비정상도는 후류의 유무와는 무관하게 모든 실험경우에서 높은 분포를 보이므로, 이것은 후류의 영향으로 보기 어렵다. 따라서 사각주로 인한 후류의 영향의 익렬의 뒷전 영역까지는 미치지 못하는 것을 알 수 있다. 이와 같이 사각주로 인한 후류는 주로 익렬의 뒷전보다는 앞전영역, 그리고 압력면보다는 흡입면 근처의 비정상도 분포에 많은 영향을 준다.

블레이드 흡입면에서의 경계층 두께를 Fig. 6에서 나타내었다. 앞전의 정체점에서부터 경계층이 발달하여 0.1 < S/C < 0.3 의 영역에서 경계층 두께가 급격한 증가를 보이다가, 다시 감소하여 0.4 < S/C < 0.5의 영역에서 최소값을 보이고, 다시 증가한다. 후류가 존재하는 경우에서 경계층 두께가 더 크게 나타난 것은 사각주 후류가 통로내의 유동을 교란하여 경계층의 발달을 촉진하였기 때문이다.

Fig. 7에서 경계층 형상계수를 나타내었다. 모

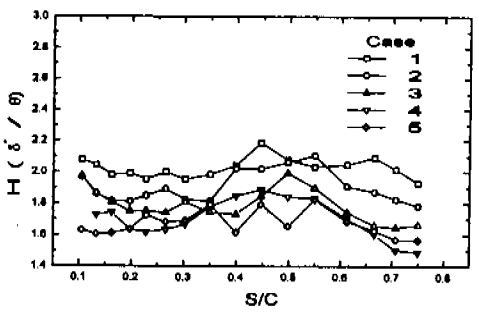
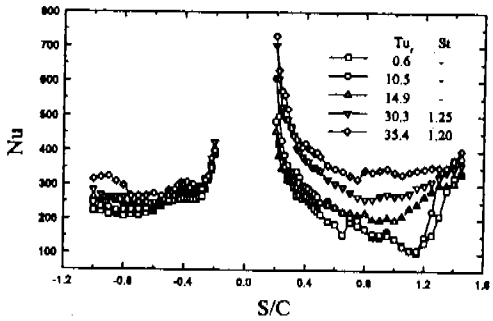
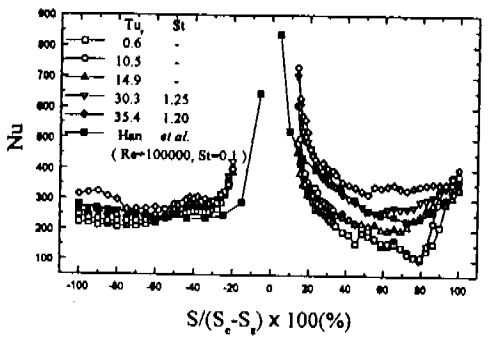


Fig. 7 Boundary layer shape factor on the suction surface.



(a)



(b)

Fig. 8 Nusselt number distributions on the blade surface.

든 측정구간에서 형상계수의 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 하

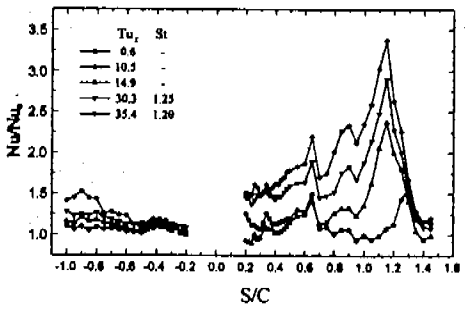


Fig. 9 The increasement ratio of the heat transfer coefficients.

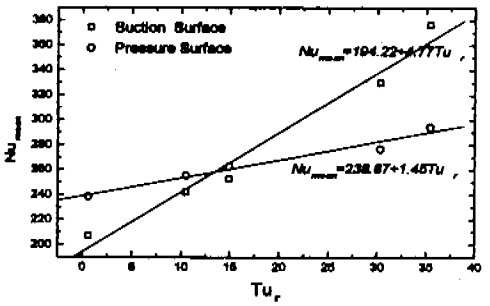


Fig. 10 Average Nusselt number for the unsteadiness.

였다. 본 실험에서 후류가 없는 경우에는 전체 측정영역에서 2.0 근처의 값을 보이므로 측정구간 내에서 경계층 천이가 발생하지 않았다는 것을 유추할 수 있다. 그러나 후류가 존재하는 경우에는 형상계수가 전반적으로 후류가 없는 경우보다 낮은 값을 보이며, 특히 S/C > 0.7 의 영역에서는 형상계수가 급격히 감소하여 1.5이하의 값을 보인다. 이것은 후류의 교란으로 인하여 경계층이 층류에서 난류로 천이되었다는 것을 의미하며 이로 인한 열전달의 증가를 예측할 수 있다.

Fig. 8(a)에서는 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 유동구조의 변화를 유발하므로 흡입면에서 후류의 영향이 더욱 크고, 이에 따라 대류열전달계수의 증가도 흡입면에서 더욱 뚜렷하다. Fig.8(b)에서는 블레이드의 표면좌표에서 앞전의 정체점에서 뒷전까지의 전체 표면길이를 백분율로 하여 Han 등[7]의 결과와 함께 나타내었다. 여기서 S_s과 S_e는 대류열전달계수 측정의 시작과 끝지점의 좌표이다. Han 등의 결과는 Reynolds 수가 100000이고 Strouhal 수가 0.1 이며, 본 실험에서 Strouhal 수가 0.12인 경우와 전체적인 열전달 계수값이 비슷하다. 앞전 근처와 뒷전 근처에서는 다소 차이를 보이는 것은 익형 형상의 차이에서 발생하는 결과이다.

대류열전달계수의 증가분포는 Fig. 9을 통하여 보다 명확하게 볼 수 있다. 여기서 Nu_0는 후류가 없는 경우의 Nusselt 수이다. 압력면의 대류열전달계수는 후류가 존재하지 않는 경우에 비하여 최고 50% 까지 증가하고 있는데 반하여 흡입면에서는 200% 이상의 증가를 보이고 있다. 또한 S/C ≈0.65에서 대류열전달 계수의 증가율이 급격한 증가를 보이는 것은 경계층 형상계수의 분포에서 살펴본 바와 같이 경계층 천이로 인한 열전달의 증가 때문으로 판단된다. 이후 S/C ≈1.15에서 증가율은 최대 값을 보이며, 이른 익렬 뒷전의 표면 근처에서 생성되는 난류의 확산이 후류에 의해 촉진되기 때문이다.

Fig. 10에서 비정상도에 따른 흡입면과 압력면에서의 평균 대류열전달 계수를 나타내었다. 평균 대류열전달 계수는 식(3)과 같이 정의하였다. 전체 블레이드 표면에서 평균대류열전달 계수는 유동의 비정상도에 대하여 선형적인 증가를 나타내었다. 따라서 평균 대류열전달 계수를 식(4)와 식(5)와 같이 비정상도의 함수로 나타낼 수 있다.

$$\overline{Nu} = \frac{\int_{S_s}^{S_e} NudS}{S_e - S_s} \tag{3}$$

흡입면 : $\overline{Nu} = 194.22 + 4.77Tu_r$ (4)

압력면 : $\overline{Nu} = 238.87 + 1.45Tu_r$ (5)

4. 결 론

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

익렬의 도입부에 설치된 사각주는 와의 유출을 통하여 주기적으로 유동을 교란하여 익렬통로에

서 비정상도를 증가시킨다. 특히 익렬의 앞전보다는 뒷전 영역에서, 압력면보다는 흡입면에서 뚜렷하게 나타난다. 또한 비정상 후류는 난류의 생성을 촉진시키며 확산을 원활하게 한다.

후류의 교란으로 인하여 흡입면에서 경계층이 두꺼워지고, 형상계수의 분포를 통하여 S/C≈0.65에서 경계층의 천이가 발생하였음을 유추할 수 있다.

블레이드 표면에서 대류열전달계수는 후류의 영향으로 전반적으로 증가하며, 특히 흡입면에서의 증가가 압력면에서보다 뚜렷하게 나타난다. 또한 경계층의 천이가 예측되는 S/C≈0.65영역에서 열전달계수가 급격하게 증가하였다. 평균대류열전달계수는 유동의 비정상도가 증가함에 따라 선형적으로 증가한다.

후 기

본 연구는 기초전력공학 공동연구소의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

(1) Zhang, L. and Han, J.-C., 1994, "Influence of Mainstream Turbulence on Heat Transfer Coeff -icients from a Gas Turbine Blade," *Journal of Heat Transfer,* Vol. 116, pp. 896~903.

(2) Blair, M.F., 1994, "An Experimental Study of Heat Transfer in a Large Scale Turbine Rotor Passage," *Journal of Turbomachinery,* Vol. 116, No. 1, pp. 1~13.

(3) Abu-Ghannam, B. J. and Shaw, R., 1980, "Natural Transition of Boundary Layers - The Effects of Turbulence, Pressure Gradient and Flow History," *Journal of Mechanical Engineering Science,* Vol. 22, No. 5, pp. 213~228.

(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) Dullenkopt, K., Schulz, A. and Wittig, S., 1991, "The Effect of Incident Wake Coditions on the Mean Heat Transfer of an Airfoil," *Journal of Turbomachinery,* Vol. 113, pp. 412~418.

(7) 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.

(8) Yamamoto, A., 1987, "Production and Develop -ment of Secondary Flows and Losses in Two Type of Straight Turbine Cascades: Part 2 - A Rotor Case," *Journal of Turbomachinery,* Vol. 109, pp. 194~200.

(9) Zaccaria, M. A., Lakshminarayana, B., 1997, "Unsteady Flow Field Due to Nozzle Wake Interaction with the Rotor in an Axial Flow Turbine: Part I - Rotor Passage Flow Field," *Journal of Turbomachinery,* Vol. 119, pp. 201~213.

(10) Kim, K. C., Yoon, S. H., Kim, D. S. and Shin, Y. H., 1994, "Investigation on the Improvement of Computer Aided Calibration Methods for Hot-Wire and Hot Film Probes," *Bulletins of the KSME,* Vol. 14, No. 4, pp. 977~985

(11) Yoon, S. H., Kim, M. K. and Lee, D. H., 1996, "Turbulent Flow and Heat Transfer Characteristics of a Two-Dimensional Oblique Plate Impinging Jet," *KSME Interantional Journ -al,* Vol. 11, No. 4, pp. 476~483.

(12) Liu, X. and Rodi, W., 1994, "Velocity measu -rements of wake-induced unsteady flow in a linear turbine cascade," *Experiments in Fluids,* Vol. 17, pp. 45~58.