

# 비정상후류가 선형터빈익렬의 유동 특성 및 익렬의 열전달에 미치는 영향에 관한 연구

윤순현, 심재경  
부산대학교 기계공학부  
이대희  
인제대학교 기계·자동차공학부

## Influence of Unsteady Wake on Flow Characteristics and Heat Transfer from Linear Turbine Cascade

Soon Hyun Yoon, Jae Kyung Sim  
School of Mech. Engr., Pusan National University  
Dae Hee Lee  
School of Mech. Engr. Inje University.

### Abstract

To examine the influence of unsteady wake on the flow and heat transfer characteristics, an experiment has been conducted in a four-vane linear cascade. 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 were measured using hot wire anemometer, and to measure the convective heat transfer coefficients on the blade surfaces liquid crystal/gold film Intrex technique was used. The disturbance by the unsteady wake is characterized by the unresolved unsteadiness. The unsteady wake enhances the turbulent motion of flow in the cascade passage. It also promotes the boundary layer development and transition. The results show that heat transfer coefficients on the suction surface increase with increasing unresolved unsteadiness.

### 1. 서론

블레이드 표면에서의 열전달은 고온의 연소가스의 유동으로 인한 대류열전달이 지배적이므로 통로에서의 유동장에 대한 정보는 블레이드의 냉각시스템을 구성하는 데 필수적이다. 그런데 터빈익렬에 유입되는 유동은 기본적으로 매우 높은 난류강도를 가지며, 이를 실험적으로 구성하기 위하여 다양한 크기의 난류격자(turbulence grid)를 주로 사용하였다. 이를 통하여 균일하고, 정상(steady)상태인 높은 난류강도를 제공하였다.<sup>(1)(2)</sup>

그러나 실제의 터빈익렬에서는 정익(stator)과 동익(rotor)의 상호간섭으로 인하여 비정상 상태의 난류가 발생하므로 난류격자를 통하여 생성된 난류특성과는 많이 다르다. 기존의 연구에서 터빈익렬에서의 비정상후류에 의한 효과를 고려하기 위하여 spoke wheel 또는 moving bar chain 등을 주로 사용하였다. 그러나 실제 유동이 가지는 복잡성을 고려하기에는 미흡하며, 또한 예측을 위한 수치 모델을 구성하기 위해서는 실험에 사용한 조건들을 사용하기가 어렵다.<sup>(3)(4)</sup> 본 연구에서는 비교적 단순한 실험장치를 통하여 비정상후류를 생성시키고, 이를 통한 상세한 유동장 및 경계층의 측정을 통하여 전산해석을 위한 충분한 자료를 확보하고자 한다.

### 2. 실험장치 및 방법

실험에 사용된 풍동은 개방형 저속풍동으로 유량은  $3\text{m}^3/\text{s}$ , 압력상승은  $0.783\text{kPa}$ 이며, 노즐출구에서의 난류강도는  $0.6\%$ 이다. 시험부는  $0.3\text{m}(W) \times 0.3\text{m}(H)$ 의 크기를 가지며 벽면은 투명아크릴로 제작되어 유동 및 온도장의 가시화를 용이하게 하였다.

블레이드의 단면형상은 저압용 터빈의 형상에 의거하여 뒤틀림 각을 생략한 2차원 형상으로 설계하였다. 익렬은 4개의 블레이드로 구성되며, 현의 길이와 자유흐름의 속도에 근거한 레이놀즈수는 66000이다. 블레이드 사이의 간격(pitch; P)은 100mm, 블레이드의 높이(span; s)는 300mm로 하여 측정단면에서의 2차원성을 확보하였다.

Fig. 1에서 보인바와 같이 익렬의 축방향 좌표를 X, 축에 수직 방향을 Y, 블레이드의 표면을 따라가는 좌표를 S로 정의하고, ②번 블레이드 앞전의 정체점을 좌표계의 원점으로 하였다.

비정상 후류는 익렬의 앞전에서 100mm 떨어진 지점에 설치된 고정된 사각주를 통하여 생성된다. 사각주의 두께(t)는 3, 5, 10, 15mm이다. 익렬내부의 유동에서 축방향(X)속도성분을 U, 퍼치방향(Y)의 속도성분을 V로 하며, 각각의 섭동속도를  $u$ ,  $v$ 로 나타낸다. 사각주에 의해서 발생하는 후류는 익렬내부의 유동을 비정상적으로 교란하므로, 이에 의한 유동의 비정상도를 다음의 식(1)과 같이 정의하였다.<sup>(5)</sup>

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

각 실험조건은 앞전에서 65mm 떨어진 지점( $X=-46.4\text{mm}$ )에서 측정하였으며, Table 1에서 각 실험경우에서의 비정상도 및 지배재파수를 나타내었다.

본 연구에서는 고정된 사각주 이외에도 두께(t) 5mm 길이(l) 33mm의 사각주를 회전시켜 보다 실제에 가까운 유동조건을 형성하여 대류열전달 계수를 측정하였다. 사각주는 블레이드의 앞전에서 100mm

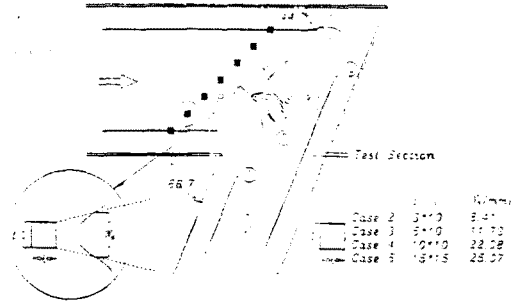


Fig. 1 Schematic diagram of the turbine cascade

떨어진 지점에 설치하였으며 벨트-풀리 시스템을 통하여 회전시키고, 스트로보스코프(stroboscope)를 사용하여 회전수를 측정하였다. 각 실험경우에서 회전수는 60, 240, 360, 480RPM 이며 회전수의 조절에는 주파수 조절장치를 사용하였다. Fig. 2는 회전하는 사각주를 사용한 후류발생장치의 개략도이다. 사각주의 회전수에 따른 영향을 파악하기 위하여 Strouhal수를 다음의 식과 같이 정의하였다.

$$Str = 2\pi f_w C / U_o \quad (2)$$

여기서  $f_w$ 는 후류의 주파수이며  $U_o$ 는 후류발생기로 유입되기 전의 자유흐름의 속도이다. 위의 정의에 따라 각 실험경우의 회전수와 Strouhal수를 Table 2에서 정리하였다.

유동장의 측정을 위하여 정온열선유속계(TSI-IFA300)를 주로 사용하였으며, 후류발생기에 유입되는 자유흐름의 유속은 디지털 마노메타를(Furness FCO12) 사용하여 측정하였다. 익렬통로에서는 X형 열선을 사용하여 측정하였고, 흡입면에서의 경계층 속도분포는 1형 열선을 사용하였다. 열선으로부터의 신호는 A/D변환기를 거쳐 P/C에 저장하였다.

흡입면과 압력면에서 대류열전달계수를 구하기 위하여 온도에 민감한 액정(thermochromic liquid crystal; 이하 TLC)을 사용하여 블레이드 표면의 온도를 측정하였다. Hue와 온도의 상관관계는 교정실험을 통하여 구하였다. 또한 측정표면에 금박막이 코팅된 폴리에스터 필름(gold film Intrex)을 부착하여 전기적으로 일정한 열유속(heat flux)을 공급하여 등열유속 경계조건을 설정하였다.

Table 1 Experimental cases using fixed bars

실험 경우	두께 t(mm)	비정상도 $Tu_r(\%)$	지배주파수 (Hz)
1	-	0.6	-
2	3	10.5	-
3	5	14.9	-
4	10	30.3	125
5	15	35.4	120

Table 2 Experimental cases using rotating bars

실험경우	회전수 (R.P.M.)	주파수 (Hz)	Strouhal수 (Str)
1	0	0	0
2	60	2	0.126
3	240	8	0.503
4	360	12	0.754
5	480	16	1.005

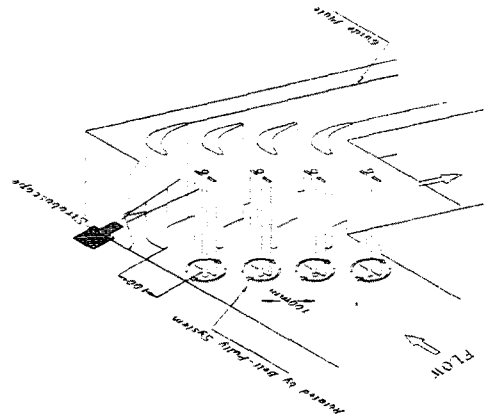


Fig. 2 Sketch of the wake generator by using rotating bars

### 3. 실험결과 및 고찰

사각주로 인한 후류는 통로내부의 유동을 교란시켜 비정상도를 증가시킨다. Fig. 3에서 통로내부의 비정상도가 각주의 두께에 따라 증가함을 볼 수 있다. 익렬의 도입부에서는 후류의 영향으로 인하여 비정상도가 증가하며, 뒷전영역으로 갈수록 후류의 영향은 상대적으로 적어지고 통로내부의 다양한 와동으로 인한 난류성분의 영향이 커진다. 그리고 압력면에서는 앞전에서 발생하는 와동으로 인하여 높은 비정상도를 보이고 있으며, 따라서 후류로 인한 비정상도의 증가가 흡입면에 비하여 미약하다. 특히 익렬의 뒷전에서 비정상도는 후류의 유무와는 무관하게 모든 실험경우에서 상대적으로 높은 분포를 보이므로, 후류가 익렬의 뒷전영역까지 영향을 주지 못하는 것을 알 수 있다. 이와 같이 사각주로 인한 후류는 주로 익렬의 뒷전보다는 앞전영역, 그리고 압력면 보다는 흡입면 근처의 비정상도 분포에 많은 영향을 준다.

사각주로 인하여 발생하는 비정상 후류는 주기적인 와의 유출(vortex shedding) 현상을 보이므로 속도성분의 주파수역 해석을 통하여 이와 같은 와동의 구조를 살펴볼 수 있다. 실험경우 1, 2, 3에서는 후류의 영향이 충분히 하류로 전달되지 못하므로 특성한 주파수에서 피크값을 나타내지 않는다. 그러나 실험경우 4, 5의 경우에는 약 120Hz 근처의 주파수에서 피크값을 나타내며 후류의 영향이 하류로 전달된다. Fig. 4에서는 실험경우 4에서 익렬의 평균선(mean line)에서 섬동속도 성분의 에너지 스펙트럼

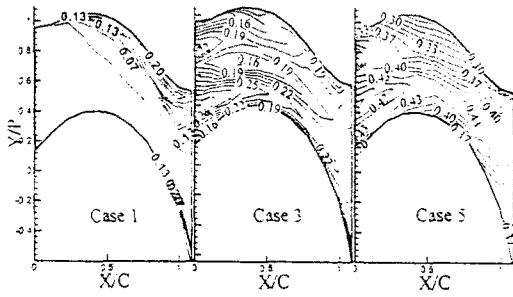


Fig. 3 Unsteadiness distribution in the cascade passage

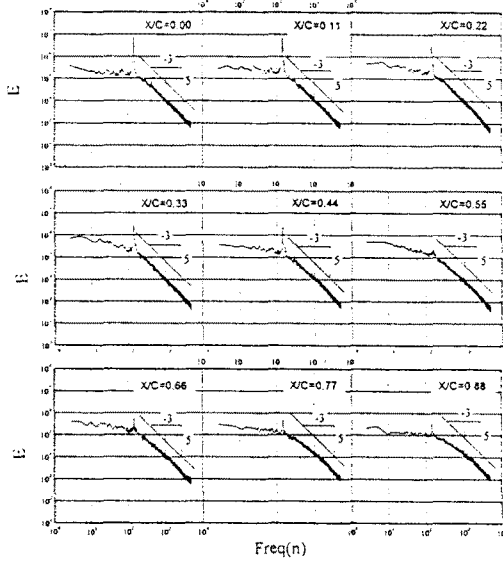


Fig. 4 Power spectrum of fluctuating velocity (power spectrum)을 나타내었다. 와의 유출로 인한 지배주파수의 영향은 익렬의 도입부에서 뚜렷하게 나타나며 통로를 지나 하류로 갈수록 미약해진다.

블레이드 흡입면에서의 경계층 두께를 Fig. 5에서 보이고 있다. 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. 후류가 존재하는 경우에서 경계층 두께가 더 크게 나타난 것은 익렬의 도입부에 설치된 사각주로 인한 압력손실과 유동의 비정상도의 증가로 인한 난류응력의 영향 때문으로 판단된다. Fig. 6에서 경계층 형상계수를 나타내었다. Liu 등에 의하면 일반적으로 형상계수의 값이 층류경계층에서는 2.0, 난류경계층에서는 1.5정도의 값을 가진다고 하였다. 후류가 없는 경우에는 전체 측정영역에서 2.0 근처의 값을 보이므로 측정구간 내에서 경계층의 천이가 발생하지 않았으며, 전반적으로 형상계수의 값이 2.4이하이므로 블레이드 표면에서의 박리는 발생하지 않았음을 알 수 있다. 그러나 후류가 존재하는 경우에는 형상계수가 전반적으로 후류가 없는 경우보다 낮은 값을 보이며, 특히  $S/C > 0.7$ 의 영역에서는 형상계수가 급격하게 감소하여 1.5이하의 값을 보인다. 이

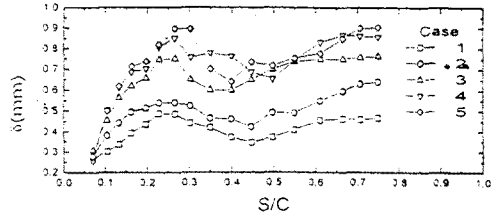


Fig. 5 Boundary layer thickness

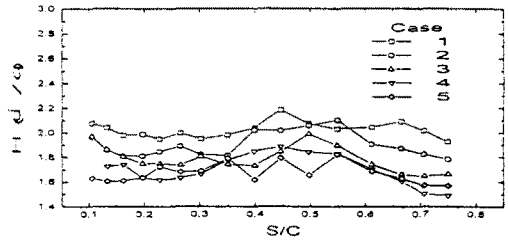


Fig. 6 Boundary layer shape factor

것은 후류의 교란으로 인하여 경계층이 층류에서 난류로 천이되었다는 것일 의미하며 이로 인한 열전달의 증가를 예측할 수 있다.<sup>(6)</sup>

Fig. 7 에는 블레이드 표면에서의 대류열전달 계수를 J.C. Han *et. al*의 결과와 함께 나타내었다. J.C. Han *et. al*의 결과중에서 레이놀즈수가 100000 이고 Strouhal 수가 0.1인 경우와 본 실험에서 Strouhal 수가 약 1.2 근처인 경우의 데이터는 전체적으로 비슷한 정도의 열전달계수를 보인다. 앞전 근처와 뒷전 근처에서는 다소 차이를 보인다. 이는 실험조건과 익형 형상의 차이에서 발생하는 결과로 판단된다. 후류의 영향으로 인하여 대류열전달계수는 전반적으로 증가하였으며, 특히 압력면 보다 흡입면에서 확연하게 증가하는 것을 볼 수 있다. 압력면에서의 후류는 단순한 혼합의 증가에 그치지 흡입면에서는 혼합의 증가 이외에도 경계층의 천이와 같은 유동구조의 변화를 유발하므로 흡입면에서 후류의 영향이 더욱 크고 이에 따라 대류열전달계수의 증가도 흡입면에서 더욱 뚜렷하다.

이와 같은 대류열전달계수의 증가분포는 Fig. 8를 통하여 보다 명확하게 볼 수 있다. 여기서  $Nu_0$ 는 후류가 없는 경우의 Nusselt 수이다. 압력면에서의 대류열전달계수는 후류가 존재하지 않는 경우에 비하여 국소적으로 최고 50%까지 증가하고 있는데 반하여 흡입면에서는 200%이상의 증가를 보이고 있다. 또한  $S/C \approx 0.65$ 에서 대류열전달계수의 증가율이 급격한 증가를 보이는 것은 경계층 형상계수의 분포에서 살펴본 바와 같이 경계층의 천이로 인한 열전달의 증가 때문(Fig. 6)으로 판단된다. 이후  $S/C \approx 1.15$ 에서 증가율은 최대값을 보이며, 이는 익렬 뒷전의 표면 근처에서 생성되는 난류의 확산이 후류에 의하여 촉진되기 때문이다.

전체 블레이드 표면에서의 평균 대류열전달계수는 유동의 비정상도에 대하여 선형적 증가를 나타내었다. 따라서 평균 대류열전달계수를 비정상도의 함수로 표현할 수 있다.

$$\text{흡입면} : Nu_{\text{mean}} = 194.22 + 4.77 Tu_r \quad (3)$$

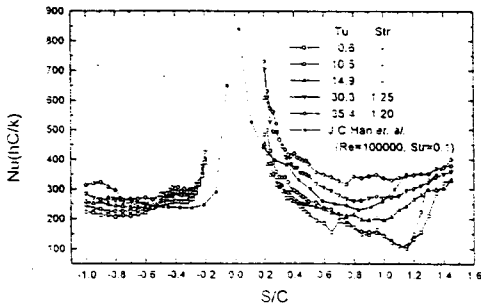


Fig. 7 Nusselt number distribution on the blade surface

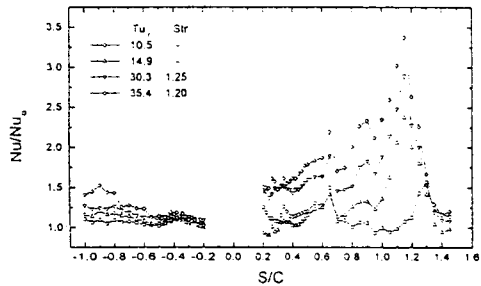


Fig. 8 The incrementation ratio of the convective heat transfer coefficient

$$\text{압력면} : Nu_{mean} = 238.87 + 1.45 Tu_r \quad (4)$$

사각주의 회전수에 따른 대류열전달계수의 분포를 Fig. 9에서 나타내었다. 고정된 사각주 후류의 경우와 비교할 때 압력면에서의 대류열전달계수의 값이 크게 나타난다. 압력면에서는 비정상후류에 의한 교란으로 경계층의 천이와 같은 유동구조의 변화를 통한 열전달량의 증가보다는 단순히 난류혼합의 증가로 인한 증가가 지배적이므로 압력면의 전체영역에서 대류열전달계수가 비교적 고르게 상승한다. 그러나 흡입면에서의 대류열전달계수는 특정영역에서 급격하게 상승한다. 따라서 흡입면에서는 유동형태의 급격한 변화(천이와 같은)가 발생한다는 것을 예측할 수 있다. 실험경우 2의 열전달계수는 J.C Han et al의 결과에서 Reynolds수 100000이고 Strouhal수 0.1의 데이타와 흡입면에서는 비슷한 분포를 보이나 압력면에서는 다소 차이를 보인다. 이는 본 실험에서 사용된 익형의 곡률이 크므로 압력면에서 형성되는 와의 크기가 상대적으로 크기 때문으로 판단된다.

#### 4. 결론

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

비정상 후류는 익렬의 통로에서 비정상도를 증가시킨다. 특히 익렬의 앞전영역에서 보다는 뒷전영역에서. 압력면 보다는 흡입면에서의 비정상도의 증가가 뚜렷하다. 또한 비정상후류는 난류의 생성을 촉진시키며 확산을 원활하게 한다.

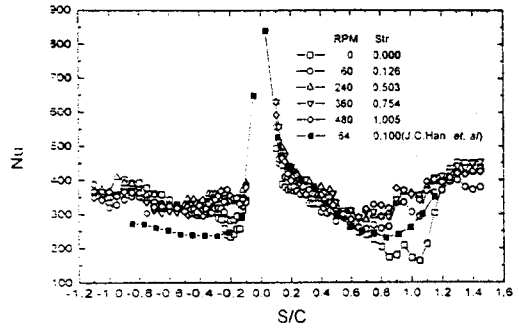


Fig. 9 Nusselt number distributions on the blade surface with variation of rotating speed

진시키며 확산을 원활하게 한다.

후류의 교란으로 인하여 흡입면에서 경계층이 두꺼워지고, 형상계수의 분포를 통하여  $S/C \approx 0.65$ 에서 경계층의 천이가 발생하였음을 유추할 수 있다.(Fig.6)

블레이드 표면에서의 대류열전달계수는 후류의 영향으로 전반적인 증가하며, 특히 흡입면에서의 증가가 압력면에서 보다 뚜렷하게 나타난다. 또한 경계층의 천이가 예측되는  $S/C \approx 0.65$ 의 영역에서 열전달계수의 증가가 급격하게 증가하므로 유동경계층과 열경계층의 상사성이 잘 이루어짐을 알 수 있다.

Strouhal수의 증가에 따라 블레이드 표면에서의 열전달은 전반적인 증가한다. 특히 흡입면에서 유동의 주기적은 교란으로 인한 열전달계수의 급격한 증가가 관찰되었다.

#### 참고문헌

- (1)Zhang, L, Han, J.-C, 1994, "Influence of Mainstream Turbulence on Heat Transfer Coefficients From a Gas Turbine Blade," ASME 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," ASME Journal of Turbomachinery, Vol. 116, p.1
- Boyle, R.J., 1991, "Navier Stokes Analysis of Turbine Blade Heat Transfer," Journal of Turbomachinery, Vol.113, p.392
- (3)Dullenkopt, K., Schulz, A., and Wittig, S., 1991, "The Effect of Incident Wake Conditions on the Mean Heat Transfer of an Airfoil," ASME Journal of Turbomachinery, Vol.113, pp.412-418
- (4)Han, J.-C, Zhang, L., Ou, S., 1993, "Influence of Unsteady Wake on Heat Transfer Coefficient From a Gas Turbine Blade", ASME Journal of Heat Transfer, Vol.115, pp.904-911
- (5)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", ASME Journal of Turbomachinery, Vol.119, pp.201-213
- (6)Liu, X., Rodi, W., 1994, "Velocity measurements of wake-induced unsteady flow in a linear turbine cascade", Experiments in Fluids, Vol.17, pp.45-58