

# 입사각이 터빈 동익 후류의 난류구조에 미치는 영향

장성일\* · 이상우\*\*

## Effect of Incidence Angle on the Turbulence Structure in the Wake of a Turbine Rotor Blade

Sung-Il Chang\*, Sang-Woo Lee\*\*

*Key Words* : Turbulence Intensity(난류강도), Energy Spectrum(에너지 스펙트럼), Wake(후류), Turbine Rotor Blade(터빈 동익), Incidence Angle(입사각)

### ABSTRACT

This paper describes the effect of the incidence angle on the turbulence structure in the wake of a turbine rotor blade at the low inlet free-stream turbulence level. For three incidence angles of -5, 0 and 5 degrees, mid-span energy spectrum as well as mid-span profiles of mean velocity magnitude and turbulence intensity are reported at three downstream locations in the wake. Vortex shedding frequencies are obtained from the energy spectrum. The result shows that as the incidence angle changes from -5 to 5 degrees, the boundary layer on the suction surface tends to be thickened, which results in widening of the wake. Strouhal numbers based on the shedding frequencies have a nearly constant value of 0.3, independent of tested incidence angles.

### 1. 서론

가스터빈 운전 시 터빈 블레이드의 후류(wake)영역은 와류유출(vortex shedding)로 인하여 비정상 유동 특성을 보이며, 이는 공기역학적 손실(loss)을 초래할 뿐만 아니라 진동 및 소음의 주요 원인이 된다. 또한 이 후류 유동은 하류에 위치한 블레이드 선단(leading edge)에서의 열전달을 증가시켜 열용력에 의한 피로파괴를 일으킨다. 일반적으로 엔진의 운전 조건이 변화할 때 터빈 블레이드로 유입되는 유동의 입사각(incidence angle)이 달라지며, 이 입사각의 변화는 블레이드 후류의 유동특성 및 난류구조(turbulence

structure)를 변화시킨다. 본 연구에서는 입사각이 터빈 동익(rotor blade) 후류의 유동 및 난류구조에 미치는 영향에 관하여 고찰하고자 한다.

실린더의 후류 유동과 관련한 연구는 Roshko<sup>(1)</sup>에 의해 최초로 이루어졌다. 그는 주기적 후류현상을 Reynolds 수에 따라 "stable", "transition", "irregular" 등의 영역으로 분류하였으며, 난류 스펙트럼으로부터 와류유출 주파수를 측정하였다. 이때 "irregular" 영역에서의 Strouhal 수는 0.21로 일정한 값을 가졌다. Gerrard<sup>(2)</sup>는 bluff body 후류의 특성길이에 관하여 연구하였다. 그는 와류형성 길이와 와류형성 영역의 전단층(shear layer) 두께가 후류의 와류유출을 결정하는 대표적인 특성길이라고 제시하였다. Perry 등<sup>(3)</sup>은 다양한 가시화기법을 이용하여 실린더 후류의 와류유출과정을 모사하였으며, Cantwell과 Coles<sup>(4)</sup>는 실린더 후류

\* 금오공과대학교 기계공학과 대학원

\*\* 금오공과대학교 기계공학과

E-mail : swlee@kumoh.ac.kr

영역의 와류유출 과정과 난류수송에 관한 종합적인 결과들을 제시하였다. 그들은 와류스트레칭(vortex stretching)이 난류생성에 직접적인 메커니즘이라고 결론지었다. Ong과 Wallace<sup>(5)</sup>는 X-형 열선프로우브를 이용하여 원형 실린더 근접 후류에서 두 속도성분들의 주파수 스펙트럼을 측정하였다.

저속에서 2차원 익형(airfoil) 후류의 난류 특성과 관련한 연구가 Campbell<sup>(6)</sup>에 의해 이루어졌다. 그는 열선을 이용하여 익형 후류의 난류강도와 스펙트럼을 측정하였다. 그 결과 입사각이 증가함에 따라 스펙트럼 주파수 분포는 넓어지며, 후류의 평균 주파수(frequency)는 후류의 속도와 폭의 비에 비례함을 보였다. Hah와 Lakshminarayana<sup>(7)</sup>는 다양한 입사각을 가지는 얇은 익형의 비대칭(asymmetric) 후류구조에 관하여 연구하였다. 그들은 여러 입사각에 대해 후류 영역의 평균 속도, 난류강도 및 레이놀즈응력 등을 측정하였다. 이때 블레이드 끝단으로부터 코드길이의 1.5 배 하류까지 비대칭성이 지속되며, 입사각이 평균 속도 분포 및 난류구조에 상당한 영향을 미친다고 결론지었다. Sauer<sup>(8)</sup>는 압축기 익열에서 입사각의 변화에 따른 손실(loss)과 와류 주파수를 측정하였다. 이로부터 입사각이 커지면 와류 주파수는 감소하며 손실은 증가한다고 결론지었다. 실제 터보기계에 대한 체계적인 와류유출 연구는 Lawaczeck와 Heinemann<sup>(9)</sup>에 의해 이루어졌다. 그들은 다양한 아음속과 천음속 터빈 익열에서 와류유출 주파수를 측정하였으며, 블레이드 끝단 두께와 하류방향 속도를 기준으로 한 Reynolds 수가  $0.3 \times 10^4 \leq Re \leq 1.6 \times 10^5$  인 범위에서 Strouhal 수는  $0.2 \leq St \leq 0.4$ 의 범위에서 변화하였다. Han과 Cox<sup>(10)</sup>는 연가시화 기법을 이용하여 터빈 블레이드 압력면(pressure side) 경계층 특성과 끝단 영역의 와류유출에 관하여 연구하였다. 그들은 블레이드 압력면의 곡률(curvature)이 경계층 천이에 큰 영향을 미친다고 결론지었다. 경계층의 상태가 와류유출에 미치는 영향에 관한 종합적인 연구가 Sieverding과 Heinemann<sup>(11)</sup>에 의해 수행되었다. 그들은 비정상 압력센서를 이용하여 평판과 익열의 양 끝단 경계층 상태가 층류경계층, 혼합경계층, 난류경계층 등인 조건에서 와류유출 주파수를 측정하였다. 층류경계층에서는 난류경계층에 비해 Strouhal 수가 더 높았으며, 혼합경계층의 Strouhal 수는 그 사이에 존재하였다. 또한 끝단 형상이 와류유출에 상당한 영향을 준다고 결론지었다. Perdichizzi와 Dossena<sup>(12)</sup>는 5공프로우브를 이용하여

입사각의 변화에 따른 2차유동(secondary flow)을 연구하였다. 그들은 입사각이 후류의 와류구조를 변화시키며, 편차각(deviation angle) 및 손실과 밀접한 관계가 있음을 입증하였다. Cicatelli와 Sieverding<sup>(13)</sup>은 large-scale 터빈 블레이드 끝단의 정상 및 비정상 압력 변화에 관하여 연구하였으며, 솔리덴 가시화를 통해 와류유출 과정을 가시화하였다. 그들은 압력 주파수 스펙트럼을 통해 와류유출 주파수를 측정하였으며, 블레이드 곡률이 압력면 와류유출 강도에 지배적인 역할을 한다고 결론지었다.

지금까지 단순 익형 및 실제 터보기계의 블레이드 하류 후류 특성과 관련한 연구가 폭넓게 이루어져 왔다. 그러나 입사각이 터빈 동익 후류의 난류구조에 미치는 영향에 관한 체계적인 연구는 아직 이루어지지 않고 있다. 본 연구에서는 입사각이 -5도, 0도, +5도 등인 경우에 대해, 고회전(high-turning) 터빈 제 1 단 동익의 후류 영역에서 평균 속도, 난류강도, 스펙트럼, 와류유출 주파수 등을 측정하였다. 본 연구 결과는 가스터빈 엔진의 터빈 성능향상 및 최적설계를 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다.

## 2. 실험

### 2.1. 실험장치

본 연구에서 사용된 익열 풍동(cascade wind tunnel)은 개방형 풍동, 입구덕트, 터빈 익열 등으로 구성된다. 개방형 풍동의 면적 축소비는 9.0이며, 최대 40 m/s까지 출구 유속의 조절이 가능하다. 이 풍동으로부터 나오는 균일 유동은 익열 상류에 위치한 입구덕트로 유입된다(Fig. 1). 이 입구덕트의 단면은 420 mm × 320 mm이며 길이는 1.2 m이다. 터빈 익열은 총 6 개의 블레이드로 구성되며 이것은 산업용 가스터빈 고회전 1단 동익의 미드스팬 형상을 근거로 large-scale로 제작되었다. Fig. 2에 이 익열의 중요 제원과 측정 위치가 제시되어 있으며, 그 중 코드길이(c), 피치(p), 스펀(s)은 각각 217.8 mm, 151.6 mm, 320 mm이다. 익형 후류의 생성에 큰 영향을 미치는 동익 끝단의 두께는 6.0 mm이다. 이 선형 블레이드의 형상 좌표는 이상우 등<sup>(14)</sup>에 자세히 기술되어 있다.

본 연구에서는 컴퓨터(PENTIUM)로 속도 및 난류 측정시스템 전체를 온라인화 하였으며, 이를 위해 다기능입출력보드(National Instrument, AT-MIO-16D-H-9)가 컴퓨터에 내장되어 있다. 익열 입구속도 측정

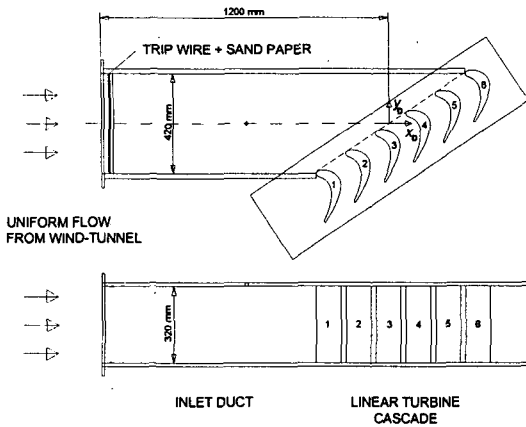
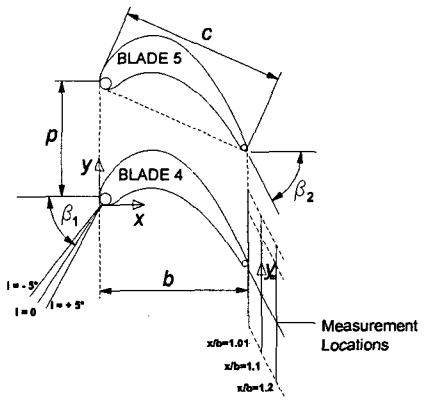


Fig. 1 Overall view of cascade wind tunnel

에는 피토-정압 프로우브를 사용하였으며, 이 압력신호는 압력변환기(Furness Controls, FC012)에 의해 전압으로 변환된다. 이 전압은 다기능입출력보드의 12-bit A-D변환기를 통해 컴퓨터로 전달된다. A-D변환기의 최대 취득속도(sampling rate)는 100kHz이며 입력단의 증폭비를 소프트웨어 상에서 1, 2, 4, 8 등으로 변화시킬 수 있다. 동익 후류의 평균속도 및 난류성분을 측정하기 위하여 I-형 열선프로우브(Kanomax, Model 0251-T5)를 사용하였다. 센서의 지름과 길이는 각각 5  $\mu\text{m}$ 와 2 mm이며 재질은 텅스텐이다. 열선프로우브는 정온형 열선유속계의 휘스톤브리지 회로에 의해 작동하며, 과열비(overheat ratio)는 1.5이다. 이 열선프로우브는 직경이 50 mm인 소형 원형풍동 출구에서 보정이 이루어졌고, 최대 보정 속도는 30m/s이다. 본 연구에서 사용한 난류측정 시스템은 열선유속계(Kanomax, 1010), 선형화기(Karnomax, 1013), low-pass 필터(Kanomax,1015)로 구성되어 있다. 프로우브의 정밀한 이송을 위하여 3차원 자동이송장치를 사용하였다. 이 장치는 3-축 방향으로 컴퓨터에 의해 자동이송되며, 각 이송축은 볼나사와 직선운동가이드로 이루어진 직선유닛, 스테핑모터 및 스테핑모터 드라이브로 구성된다.

## 2.2. 실험조건 및 오차

본 연구에서는 자유유동속도( $U_\infty$ )를 15 m/s로 고정하고 실험을 수행하였으며, 이때 입구유동의 Reynolds 수는  $2.09 \times 10^5$ 이었다.  $x_D/c = -1.5$ 에서 자유유동 난류강도는 0.3 %이며, 끝벽(endwall)에서 경계층두께, 배제두께, 운동량두께는 각각 44.7 mm, 5.16 mm, 4.04



Number of blades	6
Chord length (c)	217.8 mm
Axial chord (b)	196.0 mm
Pitch (p)	151.6 mm
Span (s)	320.0 mm
Blade inlet angle ( $\beta_1$ )	56.4 deg
Blade outlet angle ( $\beta_2$ )	-62.6 deg

Fig. 2 Arrangement of turbine cascade and measurement locations at mid-span

mm 등이었다. 블레이드 입사각을 조절하기 위하여 쉘기 형태의 알루미늄 판을 제작하여 익열 입구덕트 상하에 장착하였다. 입사각은 Fig. 2에서와 같이 입구유동이 압력면 쪽으로 치우쳐 유입되면 양(+)의 값을 갖는다. 본 연구에서는 블레이드 입사각을 -5도, 0도, +5도 등 세 경우로 변화시키면서 실험을 수행하였다.

후류에서의 난류 측정은 Fig. 2와 같이 끝단에서부터  $x$ -축 방향으로 1.96 mm, 19.6 mm, 39.2 mm 떨어진 위치들 즉  $x/b = 1.01, 1.1, 1.2$  등인 세 지점에서  $y$ -축을 따라 미드스팬(mid-span)에서 측정이 이루어졌다. 열선지지대는 블레이드 출구각(blade outlet angle) 방향과 평행하게 배치되었고, I-형 열선은 스펠 즉  $z$ -축과 평행하게 놓여졌다. Fig. 2에서와 같이 동익 #4 후류에서  $y$ -축을 따라 측정간격은 2 mm씩 총 180 mm를 측정하였다. 난류신호의 처리를 위해 선형화기로부터 출력된 전압신호는 low-pass 필터를 거친 후 A-D변환기를 통해 컴퓨터에 저장되었다. A-D변환기의 데이터 취득속도는 20 kHz이며, 10초 동안 총 200,000 개의 데이터를 취득하여 컴퓨터에 저장하였다. 이때 low-pass 필터의 cut-off 주파수는 10 kHz로 설정하였다. 후류의 난류구조를 평가하기 위하여 평균속도, 난류강도, 스펙트럼, 와류유출 주파수 등이 구해졌다.<sup>(15),(16)</sup>

Taylor의 1차원 에너지 스펙트럼(energy spectrum)

$E_1(f)$ 은 다음의 식으로 정의된다.<sup>(16)</sup>

$$\int_0^{\infty} E_1(f) df = \overline{u'^2} \quad (1)$$

여기서  $f$ 는 주파수이다. 따라서 이 에너지 스펙트럼을 전체 주파수 영역에 걸쳐 적분을 수행하면 유속의 섭동성분(fluctuation)  $u'^2$ 의 ensemble average와 같아진다. 이 에너지 스펙트럼은 PSD(power spectral density)라고 불리며 이 PSD를 계산하기 위해 FFT(Fast Fourier Transform)를 사용하였으며, 이때 주파수는 0 부터 10 kHz까지 2.88 Hz의 분해능을 가진다. 이 데이터의 처리에는 Matlab 6.1 소프트웨어가 사용되었다.

본 연구에서는 Ligrani와 Bradshaw<sup>(17,18)</sup>의 결과를 바탕으로 난류성분의 오차해석을 수행하였다. 또한 후류에서의 평균속도 오차는 Ong과 Wallace<sup>(5)</sup>의 결과를 근거로 하였다. 그 결과 난류강도의 오차는  $\pm 10\%$ 이며, 평균 속도의 오차는  $\pm 5\%$ 였다. 스펙트럼의 오차는 주파수 1200 Hz 이상에서는  $\pm 10\%$ 이상 최대  $\pm 40\%$ 의 에러를 가지며, 스펙트럼의 피크가 중요한 에러 발생의 원인이다. 이 이하 주파수에서의 오차는  $\pm 10\%$  미만이었다.

### 3. 결과 및 검토

#### 3.1. 평균 속도크기

Fig. 3은 입사각과 측정위치의 변화에 따른 미드스팬 평균 속도크기(velocity magnitude)  $Q(=(U^2+V^2)^{1/2})$  분포를 나타낸다. 이 그림에서 평균 속도와 피치방향 좌표는 각각 익열 입구 자유유동속도( $U_\infty$ )와 동익의 축방향코드길이( $b$ )로 무차원화되어 있다. 여기서 피치방향 좌표  $y_m$ 은  $y$ -축과 평행하고, 그 원점은 블레이드 끝단 중심에서 블레이드 출구각으로 하류로 연장한 선상에 위치한다(Fig.2). 따라서  $y_m$ 이 0보다 크면 흡입면 쪽을 나타내고, 0보다 작으면 압력면 쪽을 나타낸다.

일반적으로 입사각에 관계없이 후류의 형상은 그 중심을 기준으로 비대칭을 이루며, 흡입면쪽 후류 가장자리의 속도가 압력면쪽 가장자리의 속도보다 더 큰 것을 확인할 수 있다. Prato와 Lakshminarayana<sup>(19)</sup>는 이것은 블레이드의 형상으로 발생하는 압력구배(pressure gradient)의 영향이라고 설명하였다. 이 끝단 후류의 비대칭 구조는 자유유동과의 난류 혼합과 전단 작용으로 인하여 하류로 이동할수록 대칭에 가까워지

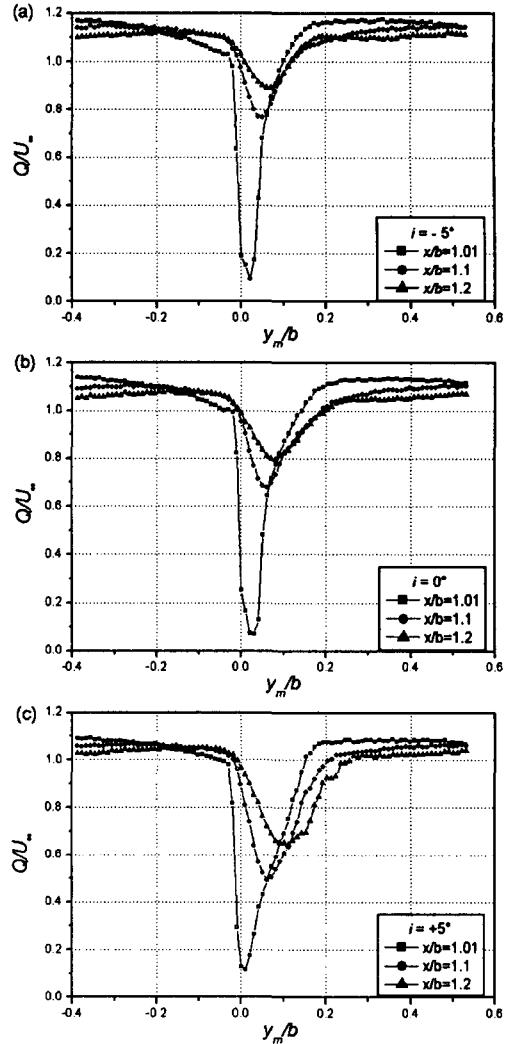


Fig. 3 Mean velocity profiles, (a)  $i = -5^\circ$   
(b)  $i = 0^\circ$  (c)  $i = +5^\circ$

고, 후류의 폭도 점차 증가하게 된다.

입사각이 -5도일 경우에는 입사각이 0도일 경우와 형상이 거의 같았지만, 입사각이 +5도일 때에는 후류의 폭이 크게 확대하였다. 특히 후류의 중심을 기준으로 흡입면 쪽에서의 확대가 두드러졌다. 이것은 입사각이 (+)가 되면 흡입면 층류 경계층 유동의 박리가 촉진되어 흡입면 경계층이 두터워지기 때문이다. 동익 끝단에서 하류로 이동함에 따라 후류 중심은 흡입면으로 편향되었으며, 입사각이 (-)에서 (+)로 변화함에 따라 편향의 정도가 심해졌다.

Fig. 4는 후류 중심에서의 속도결손(velocity defect)

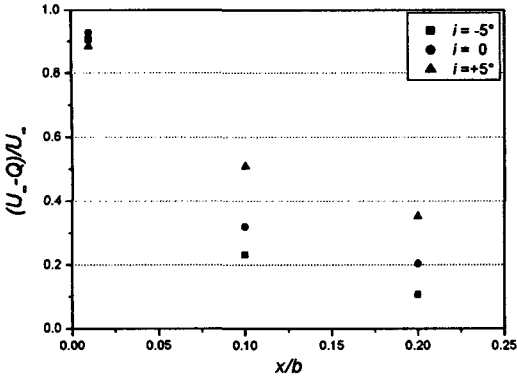


Fig. 4 Decay of velocity defect along the wake center-line

을 보여주고 있다. 후류의 속도결손은 하류방향으로 이동하면서 급격히 감소하는 것을 확인할 수 있다. 또한 입사각이 (-)에서 (+)으로 변할수록 하류방향으로의 속도결손은 비교적 완만히 감소하였다. 이것은 입사각이 (+)일 때, 후류가 하류방향으로 더 멀리까지 지속됨을 의미한다.

### 3.2. 난류강도

Fig. 5는 후류에서의 난류강도 분포를 나타낸다. 이 난류강도 값은 입구 자유유동속도로 무차원화되었다. 일반적으로 후류영역에서는 난류강도가 매우 큰 값을 갖는다. 특히 Fig. 5에서 난류강도가 피크치를 나타내는 곳은 Fig. 4에서 유속의 구배가 가장 심한 전단층과 잘 일치한다. 동익 끝단에 근접한 후류영역에서 최대 난류강도 피크는 후류 중심을 기준으로 압력면 후류영역에서 나타났으며, 흡입면 후류에서 난류강도가 큰 영역이 더 넓게 분포하였다. 이것은 동익의 압력면에서는 층류 경계층이 성장하는 반면, 흡입면에서는 난류 경계층이 성장하기 때문이다.<sup>(20)</sup> 특히 흡입면쪽에서 난류강도가 큰 영역은 입사각이 (-)에서 (+)로 변할수록 두드러지게 확대되었다. 이는 입사각이 증가할수록 흡입면쪽 난류 경계층의 두께는 두터워지기 때문이다. 이러한 난류강도의 비대칭구조는 평균속도 형상과 마찬가지로 하류방향으로 이동하면서 점차적으로 감소한다. 입사각이 (-)일 때(Fig. 5(a)), 압력면쪽 자유유동 영역에서 난류강도가 비교적 큰 이유는 압력면 쪽 선단 경계층 유동이 변곡점 근처에서 난류경계층 유동으로 급격히 천이되기 때문이다. 일반적으로 입사각이 0도거나 (+)일 경우에는 압력면쪽 선단 변곡점에서는 층류박리/재부착 현상만이 발생한다.

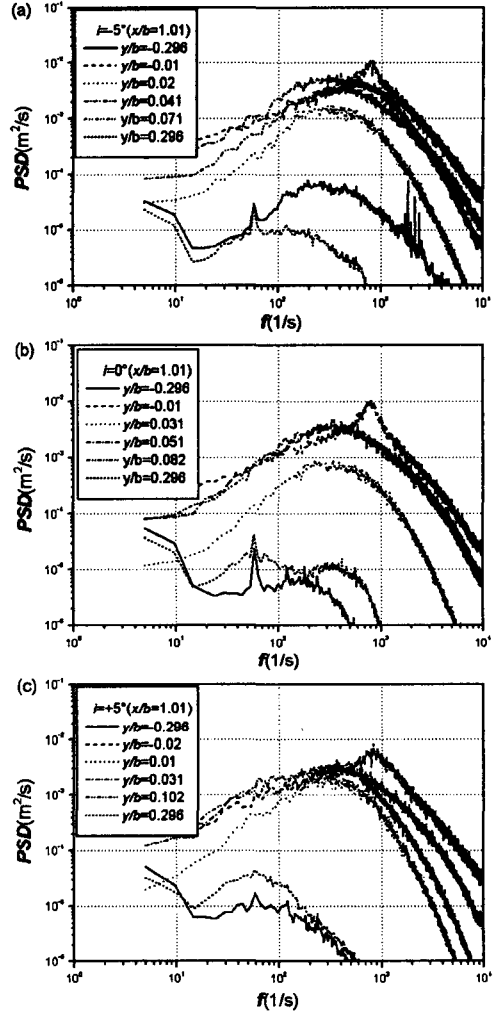


Fig. 5 Power spectral density profiles, (a)  $i = -5^\circ$  (b)  $i = 0^\circ$  (c)  $i = +5^\circ$

### 3.3. 에너지 스펙트럼

$x/b = 1.01$ 에서 측정된 난류성분 데이터를 이용하여 1차원 에너지 스펙트럼 PSD를 구하고, 그 결과를 Fig. 6 ~ 8에 제시하였다.  $x/b = 1.01$ 에서 난류강도 분포를 살펴보면(Fig. 5), 입사각에 관계없이 좌측부터 차례로 압력면쪽 자유유동, 압력면쪽 극대점, 후류 중심의 극소점, 흡입면쪽 극대점, 고원 평탄부, 흡입면쪽 자유유동 등 6개 대표적인 영역으로 구분할 수 있다. 본 연구에서는 이들 각 영역에 속하는 6개의 지점에서 구한 에너지 스펙트럼을 각 지점의 좌표와 함께 제시하였다. 에너지 스펙트럼을 정의한 식 (1)에서도 알 수 있듯이,

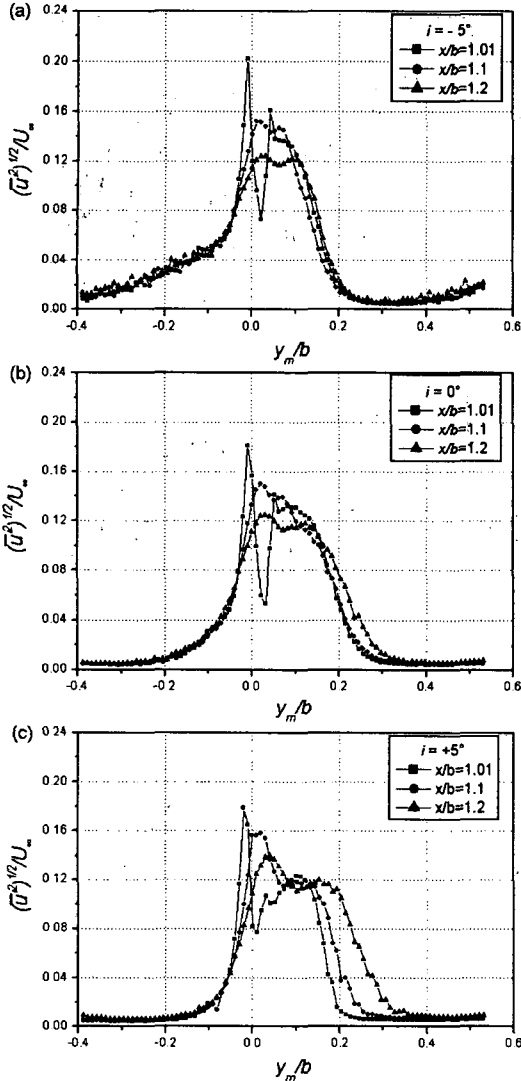


Fig. 6 Turbulence intensity profiles, (a)  $i = -5^\circ$   
(b)  $i = 0^\circ$  (c)  $i = +5^\circ$

스펙트럼은 특정한 주파수 대역에 분포된 난류 운동에너지(turbulent kinetic energy)를 나타내며, 전체 주파수 영역에 대한 적분 값이 평균(ensemble average)된 난류운동에너지  $\overline{u'^2}$ 이다.<sup>(16)</sup> Fig. 6에서 후류 영역에서의 평균 난류 운동에너지가 자유유동에서보다 훨씬 높은 값을 가지는 것을 확인할 수 있다. 이 사실은 Fig. 5에서 후류의 난류강도가 자유유동 영역에서의 값보다 훨씬 크다는 사실과 잘 일치한다. 다시 말해 Fig. 6의 각 PSD 아래 면적이 넓을수록 난류강도가

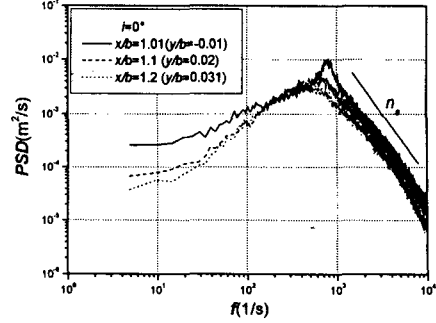


Fig. 7 Power spectral density profiles at the maximum turbulence intensity locations

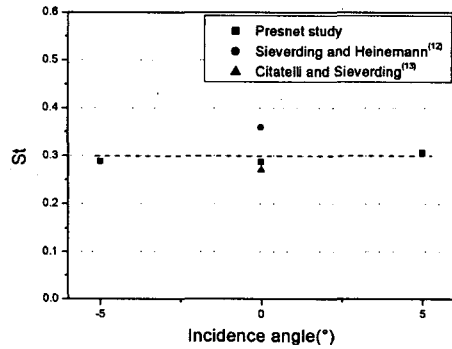


Fig. 8 Strouhal numbers at different incidence angles

큰 경우에 해당한다. Fig. 6을 자세히 조사해 보면, 난류강도가 최대인 압력면 쪽 극대점에서 PSD의 피크 값을 확실하게 관찰할 수 있다. 이 지점은 동익 압력면 끝단 근처로 와류유출이 강하게 일어나는 영역이다. Fig. 6의 결과로부터 입사각이  $-5^\circ$ 와  $0^\circ$ 일 때 뚜렷한 스펙트럼 피크치를 가지는 반면,  $+5^\circ$ 에서는 다소 넓은 피크치가 관찰된다. 이들 스펙트럼의 피크치에 해당하는 주파수가 바로 와류유출 주파수이다. 일반적으로 입사각이  $(-)$ 에서  $(+)$ 로 변화할수록 와류유출 주파수 근처에서의 에너지 집중이 완화되는 경향을 보여 주는데, 이 사실은  $(+)$  입사각이 와류유출을 억제하는 역할을 할 수 있음을 암시해 준다.

Fig. 7은 입사각이  $0^\circ$ 인 경우 난류강도가 최대인 지점 즉 압력면쪽 극대점의 에너지 스펙트럼 하류방향 변화를 보여주고 있다. 하류방향으로 이동할수록 난류 운동에너지는 감소하며, 스펙트럼 피크도 완만해졌다. Fig. 7에서 세 경우의 PSD를 자세히 비교해 보면 주파수가 100 이하인 저주파 영역에서 에너지의 감소가

빠르게 일어남을 확인할 수 있으며, 와류유출 주파수는 하류방향으로 거의 일정하였다. 이 결과로부터 에너지-캐스캐이드(energy-cascade)<sup>(15)</sup>가 주된 에너지 전달 메커니즘임을 확인할 수 있다. 특히 주파수가 대략 1000보다 큰 고주파 영역에서 에너지 스펙트럼이  $f^{-ns}$ 에 비례하는 구간을 발견할 수 있다. 본 연구에서는  $n_s$ 가 -2.3으로 일정하였으며, 이 수치는 Lakshminarayana와 Reynolds<sup>(21)</sup>의 결과 -7/3과 유사하다.

Fig. 8에서 입사각의 변화에 따른 와류유출 주파수를 나타내었다. 선행 연구와의 결과를 비교하기 위하여 와류유출 주파수( $f_s$ )를 블레이드 끝단 두께( $d$ )와 출구 자유유동 속도( $U_0$ )로 무차원화한 Strouhal 수( $St = f_s d / U_0$ )를 도입하였다. 입사각이 0도인 경우  $St$ 는 0.29로 Citatelli와 Sieverding<sup>(13)</sup>의 결과보다는 다소 높으며, Sieverding과 Heinemann<sup>(12)</sup>의 결과보다는 낮게 나타났다. 이것은 블레이드 끝단 경계층 상태와 관련이 있다. 본 연구는 블레이드 양 끝단의 경계층 상태가 혼합 경계층인 반면에 Citatelli와 Sieverding<sup>(13)</sup>는 경계층 상태가 난류인 경우에 실험을 수행하였으며, Sieverding과 Heinemann<sup>(12)</sup>의 연구에서는 양 끝단이 층류 경계층으로 형성되었다. Sieverding과 Heinemann<sup>(12)</sup>은 블레이드 경계층 상태에 따른 와류유출 주파수 실험을 통해 혼합 경계층에서의 와류유출 주파수는 난류경계층과 층류경계층 값의 사이에 놓이게 됨을 증명한 바 있다. Fig. 8의 결과로부터 본 실험이 수행된 입사각의 영역에서 Strouhal 수는 입사각에 관계없이 거의 일정한 값을 가짐을 알 수 있다. 와류유출 주파수는 경계층 두께, 끝단의 박리 및 후류의 확산(diffusion)과 밀접한 관련이 있다.<sup>(22)</sup> 이로부터 입사각  $\pm 5$ 도 영역에서는 블레이드 흡입면 끝단 난류 경계층의 박리에 입사각의 영향이 크지 않은 것으로 판단된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 입사각의 변화가 고회전 터빈 동역 후류의 난류구조에 미치는 영향에 관하여 조사하였다. 이를 위해 입사각이 -5도, 0도, +5도 등인 경우에 대하여 평균 속도, 난류강도, 에너지 스펙트럼 등을 측정하였으며, 와류유출 주파수를 Strouhal 수의 형태로 제시하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 입사각이 (-)에서 (+)로 변화함에 따라 후류의 폭이 확대되었고, 흡입면 쪽으로의 편향이 심화되었다. 입사각이 (-)에서 (+)로 변화함에 따라 하류방향 속도 결손의 감소는 더디게 진행되었다.

(2) 후류 영역에서의 난류강도는 자유유동 영역에 비하여 매우 큰 값을 가지며, 난류강도의 최대 값은 블레이드 압력면 쪽 전단층에서 발생하였다. 입사각이 (-)에서 (+)로 변화함에 따라 흡입면 난류경계층은 더 두터워졌고, 난류강도가 큰 평탄 영역이 흡입면쪽 후류에 비교적 넓게 분포하였다.

(3) 입사각이 (-)에서 (+)로 변화할수록 와류유출 주파수 근처에서의 에너지 집중이 완화되는 경향을 보여 주었다.

(4) 와류유출 주파수가 에너지 스펙트럼으로부터 구해졌다. 입사각이  $\pm 5$ 도 이하인 영역에서 Strouhal 수는 대략 0.3 정도의 일정한 값을 가졌다.

## 참고문헌

- (1) Roshko, A., 1954, "On the Development of Turbulent Wakes from Vortex Streets," NACA Report 1191
- (2) Gerrard, J. H., 1966, "The Mechanism of the Formation Region of Vortices Behind Bluff Body," J. of Fluid Mech., Vol. 25, pp. 401-413
- (3) Perry, A. E., Chong, M. S., and Lim, T. T., 1982, "The Vortex-Shedding Process Behind Two-Dimensional Bluff Bodies," J. of Fluid Mech., Vol. 116, pp. 77-90
- (4) Cantwell, B. and Coles, D., 1983, "Experimental Study of Entrainment and Transport in the Turbulent Near Wake of a Circular Cylinder," J. of Fluid Mech., Vol. 136, pp. 321-374
- (5) Ong, L. and Wallace, J., 1996, "The Velocity Field of the Turbulent Very Near Wake of a Circular Cylinder," Exp. in Fluids, Vol. 20, pp. 441-453
- (6) Campbell, G. S., 1957, "Turbulence in the Wake of a Thin Airfoil at Low Speeds," NACA TM 1427
- (7) Hah, C. and Lakshminarayana, B., 1981, "Measurement and Prediction of Mean Velocity and Turbulence Structure in the Near Wake of an Airfoil," J. of Fluid Mech., Vol. 115, pp. 251-282
- (8) Sauer, H., 1979, "Investigations on Vortex Frequencies in Wakes of Cascade," *Proceeding of the 6th Conf, Fluid Machinery*

- (9) Lawaczeck, O. and Heinemann, J., 1977, "Von Karman Vortex Street in the Wake of Subsonic and Transonic Blades," AGARD CP-177
- (10) Han, L. S. and Cox, W. R., 1983, "A Visual Study of Turbine Blade Pressure Side Boundary Layer," *ASME J. of Eng. Power*, Vol. 105, pp. 47-52
- (11) Sieverding, C. H. and Heinemann, H., 1990, "The Influence of Boundary Layer State on Vortex Shedding from Flat Plates and Turbine Cascades," *ASME J. of Turbo.*, Vol. 112, pp. 181-187
- (12) Perdichizzi, A. and Dossena, V., 1993, "Incidence Angle and Pitch-Chord Effects on Secondary Flows Downstream of a Turbine Cascade," *J. of Turbo.*, Vol. 115, pp. 308-391
- (13) Cicatelli, G. and Sieverding, C. H., 1997, "The Effect of Vortex Shedding on the Unsteady Pressure Distribution Around the Trailing Edge of a Turbine Blade," *ASME J. of Turbo.*, Vol. 119, pp. 810-819
- (14) 이상우, 전상배, 박병규, 2001, "나프탈렌승화법을 이용한 터빈 익열 끝벽에서의 열(물질) 전달계수 측정." 대한기계학회논문집(B), 제25권, 제3호, pp. 356-365
- (15) Tennekes, H. and Lumley, J. L., 1973, *A First Course in Turbulence*, MIT Press, Boston
- (16) Hinze, J. O., 1975, *Turbulence*, McGraw-Hill, NewYork
- (17) Ligrani, P. M. and Bradshaw, P., 1987, "Spatial Resolution and Measurement of Turbulence in the Viscous Sublayer Using Subminiature Hot-Wire Probes," *Exp. Fluids*, Vol. 5, pp. 407-417
- (18) Ligrani, P. M., and Bradshaw, P., 1987, "Subminiature Hot-Wire Sensors : Development and Use," *J. Phys. E*, Vol. 20, pp. 323-332
- (19) Prato, J. and Lashminarayana, B., 1993, "Investigation of Compressor Rotor Wake Structure at Peak Pressure Rise Coefficient and Effects of Loading," *ASME J. of Turbo.*, Vol. 115, pp. 487-500
- (20) 권현구, 이상우, 박병규, 2002, "큰 회전각을 가지는 터빈블레이드 표면에서 나프탈렌승화법을 이용한 열(물질)전달계수 측정," 대한기계학회 논문집(B), Vol. 26, pp. 1077-1087
- (21) Lashminarayana, B. and Reynolds, B., 1980, "Turbulence Characteristics in the Near Wake of a Compressor Rotor Blade," *AIAA J.*, Vol. 18, pp. 1354-1362
- (22) Zhang, Q., Lee, S. W., and Ligrani, P. M., "Effect of Surface Roughness and Freestream Turbulence on the Wake Turbulence Structure of a Symmetric Airfoil," to be submitted to *Physics of Fluids*