

축류 팬의 익단누설와류 및 후류에서 유량에 따른 변동속도의 주파수 특성

장춘만[†] · 김광용* · 후카노 토오루**
(2003년 8월 14일 접수, 2004년 1월 7일 심사완료)

Frequency Characteristics of Fluctuating Velocity According to Flow Rates in a Tip Leakage Vortex and a Wake Flow in an Axial Flow Fan

Choon-Man Jang, Kwang-Yong Kim and Tohru Fukano

Key Words : Rotating Hot-Wire Probe(회전 열선 프로브), Cross-Correlation(상호상관), Tip Leakage Vortex(익단누설와류), Wake Flow(후류), Frequency(주파수), Axial Flow Fan(축류 팬)

Abstract

The frequency characteristics in an axial flow fan operating at a design and three off-design operating conditions have been investigated by measuring the velocity fluctuation of a tip leakage vortex and a wake flow. Two hot-wire probe sensors rotating with the fan rotor, a fixed and a moving ones, were introduced to obtain a cross-correlation coefficient between two sensors as well as the fluctuating velocity. The results show that the spectral peaks due to the fluctuating velocity near the rotor tip are mainly observed in the reverse flow region of higher flow rates than those in the peak pressure operating condition. However, no peak frequency presents near the rotor tip for near stall condition. Detailed wake flow just downstream of the rotor blade was also measured by the rotating hot-wire sensor. The peak frequency of a high velocity fluctuation due to Karman vortex shedding in the wake region is mainly observed at the higher flow rate condition than that in the design point.

1. 서론

축류 팬에 있어서 익단누설와류(tip leakage vortex) 및 후류(wake flow)는 그 비정상 특성에 의해 팬의 중요한 소음원으로 알려져 있다. 익단누설와류의 비정상 특성은 지금까지 많은 실험 및 수치해석에 의해 연구되어지고 있다.⁽¹⁻⁴⁾ 그러나, 기존의 실험에서는 팬 로터에 대해 절대 좌표계의 관점에서 익단 내부유동장을 측정하였으나, 이 방법에서는 팬 로터의 회전수 및 날개 갯수에 따라 측정 주파수의 최대값이 정해지기 때문에 변동속

도 값의 고주파 특성을 측정하는 데 한계가 있다. 따라서, 이러한 속도변동의 주파수 특성을 측정하기 위해서는 팬 로터와 함께 회전하며 익단 유동을 실시간으로 측정할 수 있는 소위 상대 좌표계 관점에서의 측정이 유효하다.

본 연구에서는 축류 팬의 설계점 및 탈설계점에서 익단누설와류의 비정상 거동에 의한 주파수 특성을 연구 하였다. 즉, 축류 팬의 로터 익단유동장에 대해 상대 좌표계에서 측정할 수 있는 회전 열선 센서를 사용, 실시간의 변동속도 값을 측정하여 그 주파수 특성을 분석하였다. 또, 고정 및 회전 열선 센서를 로터의 허브에 장착하여 두 신호의 상관을 통한 지연시간을 이용, 익단누설와류의 동적인 특성 및 그 회전 주기 등을 고찰하였다. 한편, 유량에 따른 후류의 특성을 측정하여, 카르만 와류(Karman vortex)에 의한 변동속도 값 및 그 주파수 특성을 분석하였다.

[†] 책임저자, 회원, 인하대학교 기계공학과

E-mail : jangcm@munhak.inha.ac.kr
TEL : (032)860-7317 FAX : (032)868-1716

* 회원, 인하대학교 기계공학과

** 일본 큐슈대학교 기계과학부

Table 1 Design specifications of axial fan rotor

Flow Coefficient	0.41
Total Pressure Coefficient	0.3
Rotational Speed	1000 rpm
Tip Radius	287.5 mm
Hub-Tip Ratio	0.52
Chord Length at Tip	131 mm
Solidity at Tip	0.65
Blade Profile	NACA65 Series
Number of Blade	9

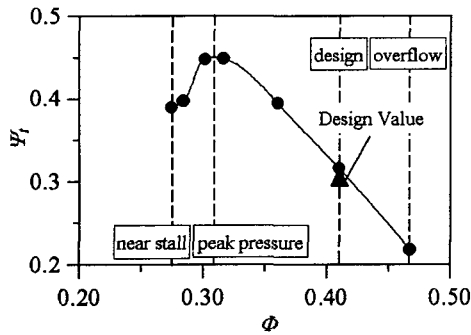


Fig. 1 Fan performance

2. 축류 팬 및 실험 방법

본 연구는 저압 축류 팬을 대상으로 하였으며, 상세한 사양은 Table 1 에 수록하였다. 날개 끝단의 틈새는 2 mm (1.5 % 틈 코드)로 균일하며, 설계점에서 유량계수 ϕ (축방향 속도를 날개 끝단의 회전속도로 무차원화함) 및 전압계수 ψ_t (날개 후연에서 전압을 동압으로 무차원화함)는 각각 0.41 과 0.3 이다. 본 실험 팬은 외경이 287.5 mm 이며, NACA65 계열의 익형을 사용하였다.

Fig. 1 은 축류 팬의 성능곡선으로서, 5 공 피토관을 사용해 팬의 상류 및 하류에서 측정된 3 차원 속도성분으로부터 추출되었다.⁽⁵⁾ 그림에서 실선은 유량에 따른 전압 분포를 나타내고, 검은 삼각형은 설계유량에 대한 전압의 설계값을 나타낸다. 설계유량에서 설계값과 실험값이 유사함을 알 수 있다. 팬의 설계방법 및 자세한 익형의 제원은 기 발표한 논문⁽⁵⁾ 에 기술하였다. 본 연구에서는 성능곡선 상에 표시한 바와 같이, 설계점을 포함하는 네 가지 다른 유량 조건($\phi=0.28, 0.31, 0.41, 0.47$)에서 익단누설와류의 비정상 특성을 연구 하였다.

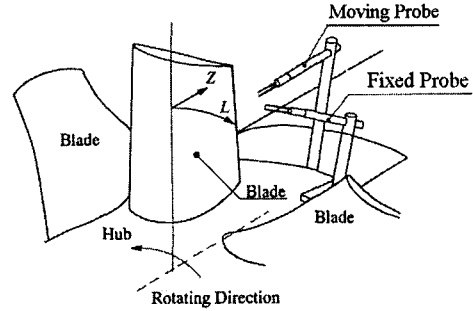


Fig. 2 Test blade measuring system

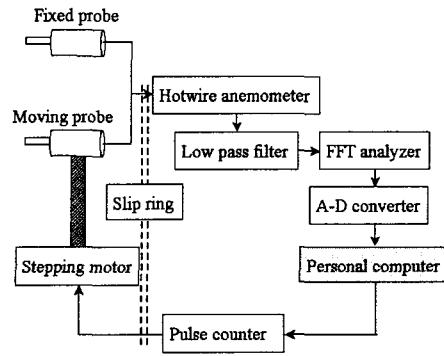


Fig. 3 Diagram of on-line measuring system

날개 끝단 근방에서 속도의 시간변동 특성을 조사하기 위하여, 팬 로터와 함께 회전하는 두 개의 I 형 열선 프로브를 사용하여 익간에서 회전 로터에 대한 상대 흐름을 측정하였다. 열선 센서는 직경이 5 μm 인 텅스텐 선으로 KANOMAX 사의 정온도(constant temperature)형 열선풍속계를 사용했다. 또, 본 축류 팬 로터를 포함하는 측정부 시스템을 Fig. 2 에 나타내었다.

그림에서 이동 프로브(moving probe)의 끝단에 반경 방향으로 장착된 열선센서는 허브 안에 설치된 이송장치의 컴퓨터 제어에 의해 축류 팬 로터가 회전하는 도중에도 반경방향, 원주방향 및 축방향으로 이동할 수 있다. 또, 고정 프로브(fixed probe)는 두 점간의 변동속도의 상호상관계수를 구하기 위해 허브면에 직접 장착하였다. 각 센서의 출력은 Fig. 3 에 나타낸 것과 같이, MICHIGAN SCIENTIFIC CORPORATION 사의 수은 슬립링을 통하여 측정용 컴퓨터에 전송되어, 자동 샘플링을 통하여 제반 통계량이 산출된다. 단, 슬립링을 통과한 데이터가 컴퓨터에 전송되기 전에 8.9 kHz 이상의 주파수성분을 제거하기 위해 low pass filter 를 사용 하였다.

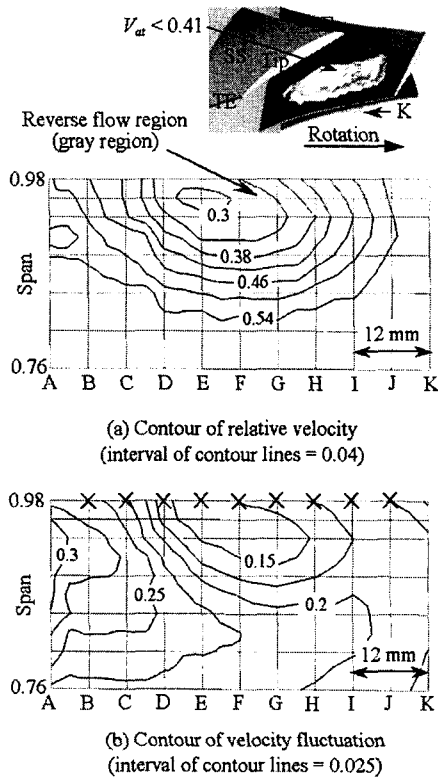


Fig. 4 Contour of relative velocity and velocity fluctuation on the quasi-orthogonal plane to the tip leakage vortex ($\Phi = 0.28$)

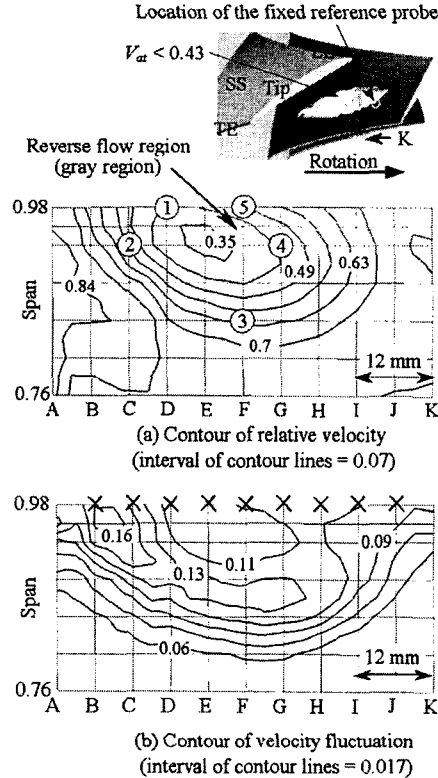


Fig. 5 Contour of relative velocity and velocity fluctuation on the quasi-orthogonal plane to the tip leakage vortex ($\Phi = 0.31$)

I 형 프로브의 검정(calibration)은, 케이싱 내에 설치되어 있는 웬 로터를 제거한 상태에서 열선 센서를 수 단계의 회전수로 바꾸어 그 때의 회전 방향 속도를 이용하여 수행하였다. 또, 실험 시 열선 센서의 위치는 이것을 지지하는 지지대의 변형량을 실험에 앞서 측정하여 보정해 주었다.

속도 및 변동속도 값은 각각의 측정 위치에서 6000 번의 샘플링 값을 평균하여 얻었으며, 변동속도의 스펙트럼 분포는 ONOSOKKI 사의 FFT 분석기를 사용하여 각 측정 지점에서 64 번 평균한 값으로 구하였다.

상호상관계수 및 지연시간은 고정 및 이동 프로브를 사용하여 동시에 실시간 속도 데이터를 추출한 후, 밴드패스필터(band pass filter)로 주목하는 주파수의 변동 성분만을 출력하여 계산하였다. 즉, 상호상관계수를 이용함으로써 상류측의 열선 센서를 통과한 변동속도의 패턴이 하류측의 열선 센서 값과 어느 정도 지연시간을 가지고 통과하는가를 알 수 있다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 유량에 따른 변동속도의 주파수 특성

익단누설와류 주위의 속도분포 및 변동속도 값의 주파수 특성을 이해하기 위하여, 익단누설와류와 거의 직각을 이루는 준직교 단면을 익간 유동장에 설정하여 단면의 측정점에서 회전 열선 센서를 이용하여 상세한 물리량 측정을 하였다. 유량에 따른 익단누설와류의 준직교 단면을 Fig. 4~7의 상단에 각각 표시하였으며, 저속도 영역과 함께 나타내었다. 그림의 횡축에서 위치 "A" 및 "K"는 익단누설와류를 기준으로 각각 상류 및 하류의 지점을 나타낸다. 측정점 "A" 및 "K"는 축방향 팁 코드를 기준으로 날개 끝단의 전연에서부터 각각 16% 및 121% 축방향으로 하류측에 위치한다. Fig. 4(a)에서 알 수 있듯이, 익단누설와류에 준 직교하는 면상의 측정점간 거리는 6 mm 이며, 날개 선단에서는 반경방향으로 3 mm 간격을 촘촘이 두어 측정점을 설정하였다.

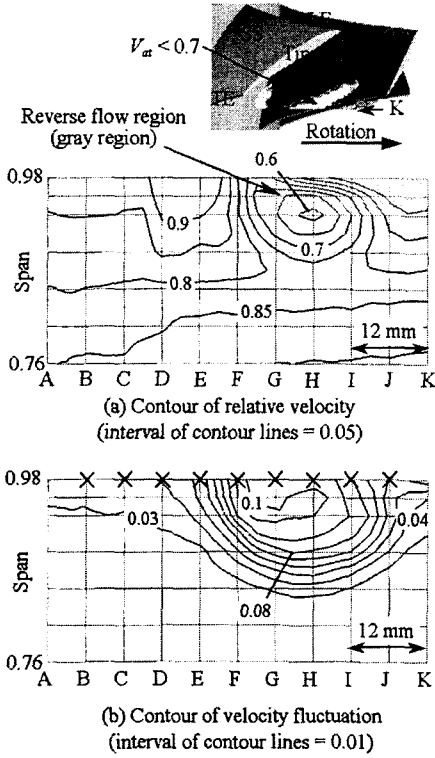


Fig. 6 Contour of relative velocity and velocity fluctuation on the quasi-orthogonal plane to the tip leakage vortex ($\Phi = 0.41$)

Fig. 1의 성능곡선에 나타냈듯이, 스톨(stall, $\Phi = 0.28$) 근방의 유량조건에서의 상대속도 및 변동속도 값의 분포를 Fig. 4에 나타내었다. 상대속도 V_{ar} 는 날개 끝단의 회전속도 U_t 로 무차원화하였으며, 다음과 같이 정의하였다.

$$V_{ar} = \frac{\sqrt{V_a^2 + V_t^2}}{U_t} \quad (1)$$

여기서, V_a 및 V_t 는 각각 축방향 및 회전 방향 속도를 나타낸다. 또, 변동속도는 변동속도성분의 RMS 값을 날개 끝단의 회전속도로 무차원하여 평가 하였다. 설계 유량에서의 저 속도 영역(익단 누설와류, $V_{ar} < 0.41$)은 Fig. 4의 상단에 준직교 단면과 함께 나타내었다.

Fig. 4(a)에서 보듯이, 상대속도 값이 적은 영역($V_{ar} < 0.5$)이 날개 끝단에 넓게 분포되어 있으며, 그림에서 회색으로 표시한 역류 영역이 날개 끝단부에 존재한다. 스톨 유량조건에서는 일반적으로 익단누설와류가 시간에 따라 심한 변동을 하며 경우에 따라 날개의 전연과도 간섭을 하는 것으로 알려져 있으며, (6) 본 실험에서도 익간 유로에서

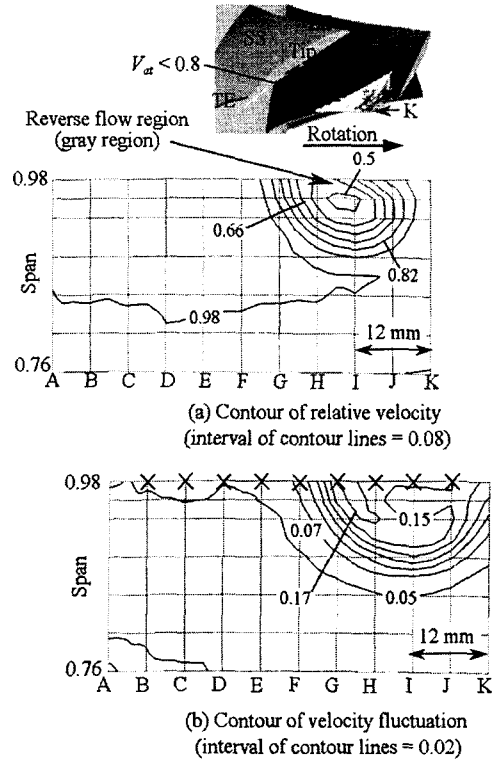


Fig. 7 Contour of relative velocity and velocity fluctuation on the quasi-orthogonal plane to the tip leakage vortex ($\Phi = 0.47$)

익단누설와류의 변동에 의한 저속의 상대속도 영역이 발생됨을 알 수 있었다.

한편, Fig. 4(b)에서 보듯이, 높은 값을 갖는 변동속도 영역이 익단누설와류의 상류(전연근방)에 분포하고 있으며, 또한 날개 끝단에 넓게 분포하는 저속의 누설와류가 주류에 대해 장애가 되므로 주류와 익단누설와류가 간섭하는 상류에 높은 값을 나타내고 있음을 알 수 있다.

Fig. 5는 Fig. 4와 같은 방법으로 나타냈으며, Fig. 1의 웬 성능곡선에서 최대압력지점의 유량조건($\Phi = 0.31$)에서의 상대속도 및 변동속도 값의 분포를 나타내었다. Fig. 5(a)의 상대속도분포에서 보듯이, 익단누설와류는 날개 선단에서 20% 스펠 영역까지 존재하며, 본 실험방법을 통하여 그 위치 및 크기를 상세히 추출할 수 있었다. 한편, 변동속도 분포는 Fig. 5(b)에서 보듯이, 스톨 근방의 유량조건에서와는 달리 주류와 익단누설와류가 간섭하는 영역에서 비교적 크게 나타난다.

Fig. 6과 Fig. 7은 Fig. 4와 같은 방법으로 나타냈으며, 설계유량 및 과대유량($\Phi = 0.47$)에서의 상대속도 및 변동속도 값의 분포를 나타내었다.

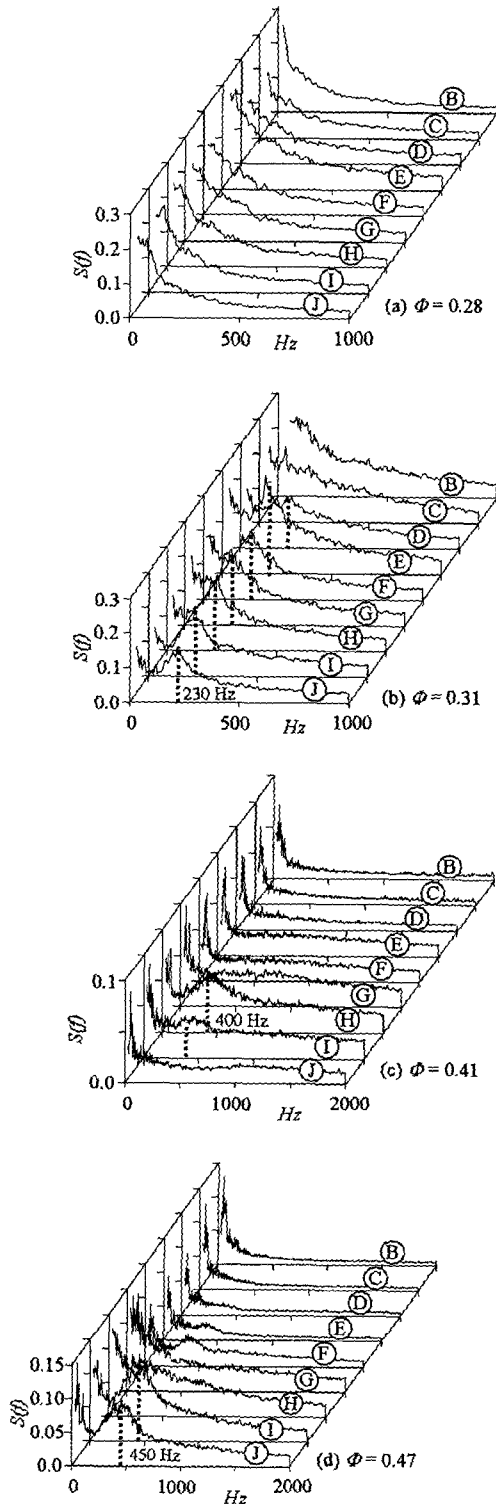


Fig. 8 Spectrum of velocity fluctuation at 0.98 percent span for four different flow rates

상대속도분포(Fig. 6(a)와 Fig. 7(a)에서 보듯이, 익단누설와류는 날개 끝단에서 약 15 % 스펠 영역까지 존재하며, 익단누설와류의 상대속도 값은 유량이 증가함에 따라 크기가 증가함을 알 수 있다. 또한, 누설와류의 중심점은 유량이 증가함에 따라 하류 방향으로 이동함을 알 수 있다. 익단누설와류의 상단부에 존재하는 역류 영역도 유량이 증가함에 따라 크기가 작아짐을 알 수 있다. 한편, 변동속도 값의 분포는 Fig. 6(b) 및 Fig. 7(b)에서 보듯이, 최대압력지점의 유량조건에서의 경향과 같이 주류와 익단누설와류가 간섭하는 영역에서 비교적 크게 나타난다. 이상에서와 같이, 유량에 따른 익단누설와류의 상대속도분포와 그 변동값의 분포는 펌 로터와 함께 회전하는 회전 열선유속계를 이용하여 상세히 고찰할 수 있었다.

Fig. 8은 Figs. 4~7에서 나타낸 바와 같이 4 곳의 유량점을 대상으로, 98 %스팬의 x로 표시한 측정점에서 변동속도 값의 스펙트럼 분포를 각각 표시하였다. 그림의 횡축은 주파수 Hz 를, 종축은 스펙트럼 밀도값 $S(f)$ 을 각각 나타낸다.

Fig. 8(a)에서 보듯이, 스톨 근방의 유량조건($\Phi = 0.28$)에서는 전영역에서 피크 주파수가(peak frequency) 존재하지 않음을 알 수 있다. 한편, 최대압력지점의 유량조건 보다 큰 유량에서는 변동속도 값의 피크 주파수가 역류영역에서 존재함을 알 수 있다. 또, 이 피크 주파수 값은 유량의 증가와 함께 230 Hz 에서 450 Hz 로 증가함을 알 수 있다. 이것은 유량이 증가함에 따라 날개틈새에서 발생하는 누설 제트(leakage jet)의 양이 증가함과 동시에 그 속도도 크게 되어 익단누설와류의 회전주기가 짧아짐을 의미한다. 즉, 유량이 증가함에 따라 익단누설와류의 크기는 작아지고, 절대와도(absolute vorticity)는 증가함을 의미한다. 또, 축류 펌의 날개 끝단의 역류 영역에서 발생하는 피크 주파수는 누설와류에 의해 기인하는 익단 소음의 중요한 생성원으로 알려져 있다.^(7,8)

3.2 상호상관해석에 의한 익단누설와류의 특성

앞 절에서 설명한 내용과 같이, 날개 끝단 근방의 역류영역에서 주기성을 갖는 변동속도 값이 존재함을 알 수 있다. 본 연구에서는 익단누설와류 내의 변동속도 값의 상호상관의 지연시간을 추출하여 준직교 단면에서의 익단누설와류의 변동의 주기를 조사하였다.

Fig. 5의 상단에 나타낸 것과 같이 고정 열선 프로브를 피크 주파수를 갖는 익단누설와류의 역류영역에 설치하고, Fig. 5(a)의 준직교 단면에서

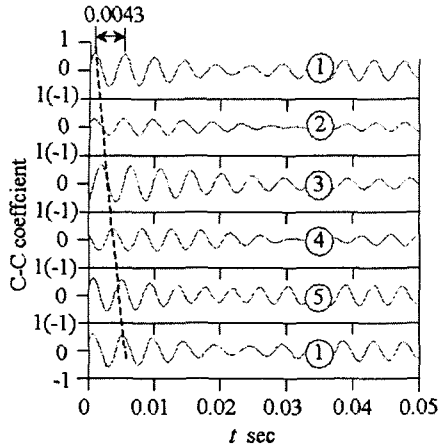


Fig. 9 Distribution of cross-correlation(C-C) coefficient ($\Phi = 0.31$, see Fig. 5(a))

이동 프로브를 ①~⑤위치에 두고 고정 프로브와 동시에 실시간 변동속도 값을 측정하였다. 측정시 샘플링 주파수는 5120 Hz 이며, 이 값은 Fig. 8(b)의 피크 주파수 230 Hz 의 약 22 배이며 충분한 시간 해상도를 갖게 하였다. 또한, 샘플링 시간은 약 0.6 초인데, 이것은 웬 로터의 80 회전에 상당한다. 출력된 데이터는 210 Hz - 250 Hz 의 밴드패스필터 (band pass filter)에 의해 처리하여, 상호상관계수 및 지연시간을 산출하였다.

Fig. 9는 웬 성능곡선의 최대압력지점 유량조건 ($\Phi = 0.31$)에서 고정 프로브와 5 곳의 이동 프로브 (Fig. 5(a))의 상호상관계수 분포를 나타낸 그림이다. 그림에서 보듯이, 상관계수의 최대값이 대체로 0.7 이상의 값을 가지며, 익단누설와류 내의 신호간에 높은 상관관계가 있음을 알 수 있다. 상관을 측정하는 두 곳의 센서간에 거리가 없을 때는 지연시간은 0 이 되며, 이 때에 상관계수는 최대의 피크값을 갖는다. 두 개 센서의 거리가 커지면 상관계수 피크의 지연시간도 증가하며, 피크값도 약간 낮아진다.

지연시간은 상관계수의 첫번째 피크값의 시간으로 정하였으며, 익단누설와류의 준직교 단면의 5 곳(Fig. 5(a))에서의 지연시간을 Fig. 9에 점선으로 나타내었다. 즉, 지연시간은 익단누설와류에 대해 반시계 방향으로 증가하며, 이는 와류의 회전방향을 의미한다. 또, 변동속도의 주기는 0.0043 초이며, 이는 Fig. 8(b)에서 보여준 변동속도의 피크 주파수 230 Hz 와 일치한다. 이상의 결과로부터 피크 주파수 230 Hz 는 최대압력지점의 유량조건에서 익단누설와류의 1 회전 값에 상당함을 알 수 있다.

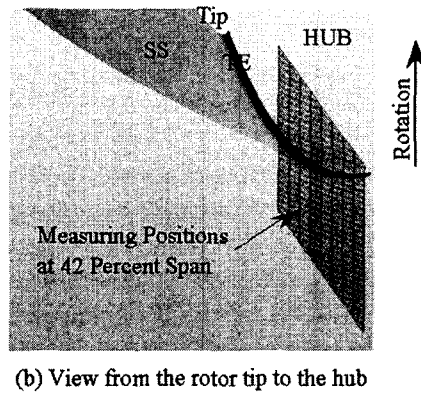
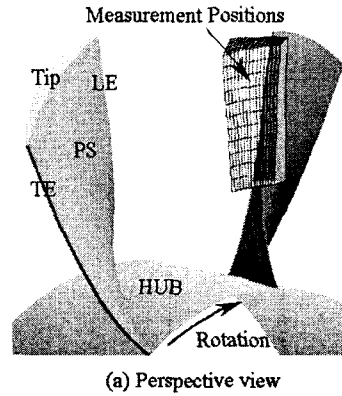


Fig. 10 Experimental grid in the wake region

3.3 후류영역에서 변동속도에 의한 주파수 특성 Fukano 등⁹⁾은 회전하는 평판익의 후류에서 발생하는 주기적인 변동속도가 광대역 소음의 중요한 소음원임을 밝히고, 날개 끝단의 단면 형상에 따른 주기적인 변동속도 특성을 연구하였다. 본 연구에서는 축류 웬의 후류에서 그 특성을 대별할 수 있는 두 개의 유량조건에서 축류 웬의 소음원 중의 하나인 후류 영역에서의 속도변동의 주파수 특성을 회전 열선 유속계를 이용하여 실험적으로 연구하였다.

Fig. 10은 축류 웬의 후류에서 변동속도 및 그 주파수 특성을 측정하기 위한 측정 격자를 나타낸다. 측정영역은 반경방향으로는 42 % Span 에서 98 % Span 까지이며, 간격은 3 mm 로 하였다. Fig. 10(b)에서 보듯이, 날개 후면과 측정격자의 첫번째 선과의 거리는 2 mm (1.5 % 팁 코드)이며, 축방향 및 회전 방향의 측정 격자수는 각각 9 개 및 56 개 로 설정하였다. 특히, 회전방향으로는 측정간격을 1 mm 로 설정하여, 급격한 속도 변화를 상세히 측정하였다.

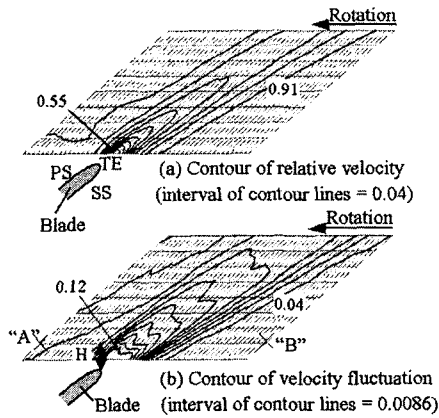


Fig. 11 Contour of relative velocity and velocity fluctuation on the plane of 83 percent span in the wake region ($\Phi = 0.47$)

Fig. 11 은 과대유량($\Phi = 0.47$) 운전조건에서, 후류의 상대속도, 변동값 그리고 변동속도의 주파수 특성을 나타내고 있다. Fig. 11(a) 및 Fig. 11(b)에서 보듯이 후류에 의한 상대속도의 골이 선명하게 보이며, 카르만 와류에 의한 높은 속도 변동값이 후류에 의해 생긴 골의 좌우에 존재함을 알 수 있다.

Fig. 11(c)는 날개 후연에서 4% 축방향 코드 만큼 하류에 위치한 지점(Fig. 11(b)에서 H)에서의 변동속도의 주파수 분포를 나타내고 있다. 즉, 변동속도에 의한 주파수는 약 1700 Hz 근처값을 가지며, 카르만 와류에 의해 발생한 높은 변동속도 값 영역에 나타남을 알 수 있다. 이 고주파 특성을 갖는 1700 Hz 의 피크 주파수는 동일유량 조건에서 470 Hz 를 갖는 익단누설와류의 변동에 의한 저주파 피크값과는 구별되며, Fukano 등⁽⁹⁾이 평판의 후류실험에서 밝혔듯이 축류 팬의 후류에서 발생하는 중요한 소음원이라 생각된다.

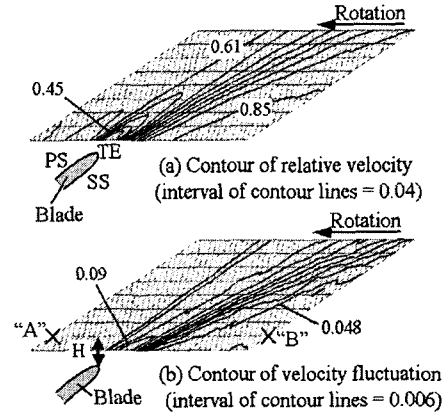
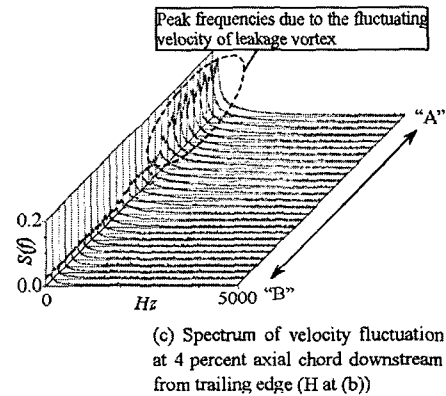
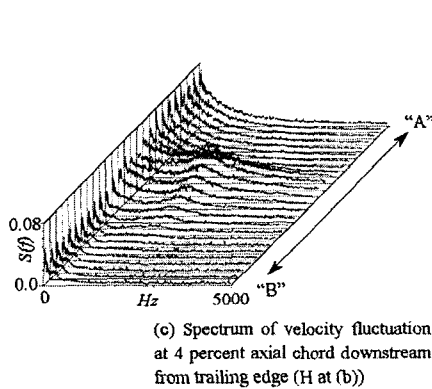


Fig. 12 Contour of relative velocity and velocity fluctuation on the plane of 88 percent span in the wake region ($\Phi = 0.31$)

Fig. 12 는 저유량 (성능곡선에서 최대압력지점의 유량, $\Phi = 0.31$) 운전 조건에서, Fig. 11 에서 나타난 것과 같은 물리량 분포를 나타내었다. 후류에 의한 상대속도의 골은 Fig. 12(a)의 저유량 조건에서도 선명하게 보이지만, Fig. 12(b)에서 나타난 것과 같이 카르만 와류에 의한 변동속도 값의 골은 나타나지 않고, 변동속도 값의 피크 주파수의 값(Fig. 12(c))도 나타나지 않음을 알 수 있다. 다만, Fig. 12(c)의 압력면 측에 나타난 피크주파수는 익단누설와류의 변동속도에 기인한 것이다.

본 실험적 연구를 통하여, 설계점보다 저유량 조건에서는 후류에서의 변동속도의 피크 주파수가 나타나지 않거나 그 크기가 적음을 알 수 있었으며, 이는 저유량 조건일수록 후류 영역에서 변동속도에 의한 팬 소음 증가 효과가 줄어들음을 의미한다. 즉, 축류 팬에서 카르만 와류에 의한 후류에서의 피크 주파수에 의한 소음원 증가는 설계 유량점 이상에서 영향이 크다.



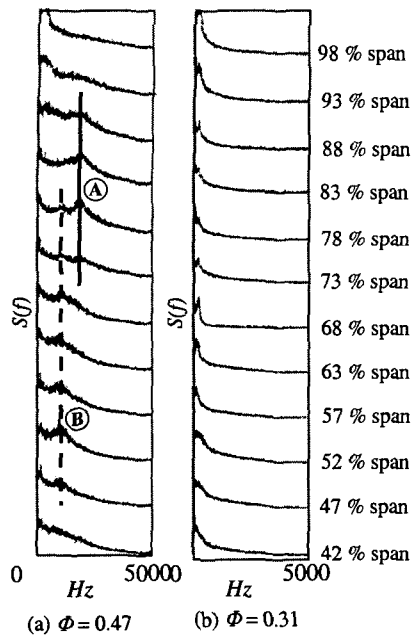


Fig. 13 Spectral distribution of the velocity fluctuation along a blade span in the wake region

Fig. 13 은 과대유량($\Phi = 0.47$) 및 저유량($\Phi = 0.31$) 운전조건에서, 스펠방향에 따른 후류의 변동속도의 주파수 특성을 나타내고 있다. Fig. 13(a) 에서 보듯이, 익단누설와류가 후류의 흐름에 영향을 미치는 날개 끝단 근처를 제외하고는 전 스펠영역에서 피크 주파수(A는 1700 Hz, B는 1050 Hz)가 존재함을 알 수 있다. 그러나, Fig. 13(b)의 저유량 조건에서는 전 스펠에서 피크 주파수값이 존재하지 않음을 알 수 있다.

4. 결론

두 개의 열선 유속계를 사용하여 날개 끝단의 익간 유동과 후류를 실시간으로 측정하여 유량에 따른 속도변동의 주파수 특성을 상세히 고찰하여 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 스펠 유량 조건에서는 익단누설와류의 상류(전연근방)측에 높은 값을 갖는 변동속도 영역이 존재하지만, 날개 끝단에서 변동의 피크주파수는 나타나지 않는다.

(2) 스펠 영역을 제외한 유량조건에서는 날개 끝단의 역류영역에서 유량의 증가와 함께 변동속도의 피크 주파수가 증가하며, 이는 누설체트의 속도가 증가하여 익단누설와류의 회전 주기가 짧아짐을 의미한다.

(3) 익단누설와류의 주기는 누설와류의 피크 주

파수와 일치함을 알 수 있었다.

(4) 설계유량보다 큰 유량조건에서는 팬 로터의 후류에 카르만 와류에 의한 높은 변동속도 값이 후류에 의해 생긴 상대속도의 끝의 좌우에 두 개의 선으로 나타나며, 이 변동에 의한 주파수는 1000 Hz 이상으로 익단누설와류에 의한 변동속도의 피크 주파수에 비해 고주파 특성을 갖는다.

후 기

본 연구에 있어서 실험을 도와준 일본 큐슈대학교의 Sato 씨께 감사를 표합니다.

참고문헌

- (1) Murthy, K. N. S., and Lakshminarayana, B., 1986, "Laser Doppler Velocimeter Measurement in the Tip Region of a Compressor Rotor," *AIAA J.*, Vol. 24, No. 5, pp. 807-814.
- (2) Inoue, M., and Kuroumaru, M., 1989, "Structure of Tip Clearance Flow in an Isolated Axial Compressor Rotor," *ASME J. Turbomachin.*, Vol. 111, pp. 250-256.
- (3) Lakshminarayana, B., Zaccaria, M., and Marathe, B., 1995, "The Structure of Tip Clearance Flow in Axial Flow Compressors," *ASME J. Turbomachin.*, Vol. 117, pp. 336-347.
- (4) Ro, S. H. and Cho, K. R., 1998, "Numerical Analysis on the Blade Tip Clearance Flow in the Axial Rotor - The Variation of Leakage Vortex with Tip Clearance," *Trans. of KSME (B)*, Vol. 22, No. 3, pp. 336-345.
- (5) Jang, C.-M. and Kim, K. Y., 2003, "Flow Measurements and Performance Analysis Using a 5-Hole Pitot Tube and a Rotating Hot-Wire Probe in an Axial Flow Fan," *Trans. of KSME (B)*, Vol. 27, No. 12, pp. 1750-1757.
- (6) Inoue, M., and Furukawa, M., 2002, "Physics of Tip Clearance Flow in Turbomachinery," *ASME FEDSM 31184*, pp. 1-13.
- (7) Jang, C. M., Ogata, N., Furukawa, M., and Fukano, T., 2002, "Characteristics of Three-Dimensional Flow Field and Velocity Fluctuation Near the Rotor Tip in an Axial Flow Fan (Relation to the Noise Generation)," *Trans. of JSME (B)*, Vol. 68, No. 673, pp. 2460-2466.
- (8) Kameier, F. and Neise, W., 1997, "Experimental Study of Tip Clearance Losses and Noise in Axial Turbomachines and Their Reduction," *Trans. of ASME, J. Turbomach.*, Vol. 119, pp. 460-471.
- (9) Fukano, T., Saruwatari, H., Hayashi, H., Isobe, H., and Fukuhara, M., 1995, "Periodic Velocity Fluctuation in the Near Wake of a Rotating Flat-Plate Blade and Their Role in the Generation of Broadband Noise," *J. Sound Vib.*, Vol. 181, pp. 53-70.