

< 논문 >

## 유량에 따른 축류팬의 익단누설와류 및 후류 특성

장 춘 만<sup>†</sup> · 김 광 용<sup>\*</sup>

(2004년 8월 30일 접수, 2005년 1월 12일 심사완료)

### Flow Characteristics of a Wake Flow with Relation to a Tip Leakage Vortex at Different Flow Rates in an Axial Flow Fan

Choon-Man Jang and Kwang-Yong Kim

**Key Words :** Axial Flow Fan(축류팬), Rotating Hot-Wire Sensor(회전열선센서), Tip Leakage Vortex(익단누설와류), Wake Flow(후류)

#### Abstract

The flow characteristics in the blade passage and in the wake region of a low speed axial flow fan have been investigated by experimental analysis using a rotating hot-wire sensor for design and off-design operating conditions. The results show that the tip leakage vortex is moved upstream when flow rate is decreased, thus disturbing the formation of wake flow near the rotor tip. The tip leakage vortex interfaces with blade pressure surface, and results in high velocity fluctuation near the pressure surface. From axial velocity distributions downstream of the fan rotor, large axial velocity decay near the rotor tip is observed at near stall condition, which results in large blockage compared to that at the design condition. Although the wake flow downstream of the rotor blade is clearly measured at all operating conditions, the trough of the high velocity fluctuation due to Karmann vortex street in the wake flow is mainly observed at a higher flow condition than the design flow rate.

#### 1. 서 론

본 연구에서는 저속 축류팬의 익단누설와류(tip leakage vortex) 및 후류(wake flow)의 특성 및 상호관계를 설계 유량점뿐만 아니라 탈설계(off-design)유량점에서도 고찰하였다. 축류형 유체기계에 있어서 익단누설와류의 특성은 지금까지 많은 실험 및 수치해석적 연구방법에 의해 수행되어지고 있다.<sup>(1-6)</sup> Inoue 등<sup>(3,7)</sup>은 축류 압축기 날개 선단의 누설와류구조를 실험 및 수치해석을 통하여 분석하였으며, 날개 틈새의 누설제트(leakage jet)와 날개 부압면 경계층의 전단면에 의해 생성된 누설와류는 날개 틈새가 클수록 날개의 압력면에 접근한다고 보고하였다.

로터 익간 유동을 측정하는 대부분의 실험적 연구에서는 회전하는 로터 익에 대하여 절대 좌표계 관점에서 유동장 특성을 측정하였으며, 익단 누설와류를 포함하여 시간평균 유동장 계측에는 유효한 방법으로 알려져 있다. 그러나, 비정상 특성을 갖는 익단누설와류의 시간 변동을 보다 정확히 측정하기 위해서는 회전하는 로터 익간의 유동장을 실시간으로 측정 가능한 상대 좌표계(즉, 로터와 함께 회전하는)에 의한 측정 방법이 필요하다. Fukano 등<sup>(8)</sup>은 평판 익의 후방에서 생성되는 카르만 와류(Karman vortex)에 의한 주기적인 속도섭동을 측정하기 위하여 평판 익과 함께 회전하는 열선 센서를 로터 허브 내에 장착된 이송장치에 연결시켜 측정하였다. Fukano와 Jang<sup>(6)</sup>은 축류팬의 익단소음 특성을 연구하기 위하여 축류팬 로터와 함께 회전하는 열선 센서를 사용하여 익간에서 회전 로터에 대한 상대 흐름 및 특정 지점에서 얻은 실시간 속도섭동치를 이용하여 주파수를 측정하였다.

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 한국건설기술연구원

E-mail : jangcm@kict.re.kr

TEL : (031)910-0389 FAX : (031)910-0381

<sup>\*</sup> 회원, 인하대학교 기계공학부

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

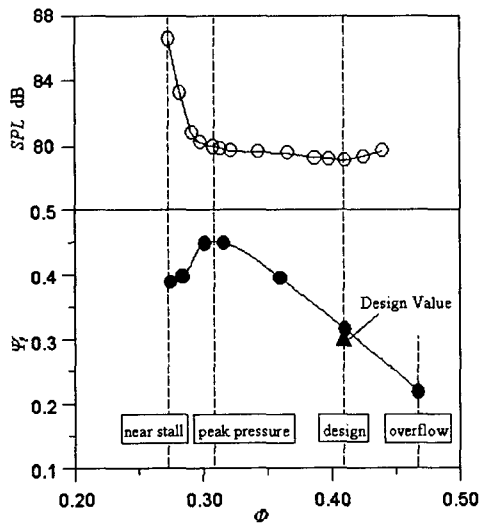


Fig. 1 Sound pressure level and total pressure rise

본 연구에서는 축류팬의 익단 유동장에 대해 상대 좌표계에서 측정할 수 있는 회전 열선 센서를 사용하여 날개의 부압면 영역을 포함하는 익단에서 시간평균 유동 특성을 설계 유량점 및 탈설계 유량조건에서 측정하였다. 또한, 날개의 끝단의 부압면 근방과 후류에서 유량에 따른 후류의 특성을 익단누설와류의 거동과 연관시켜 고찰하였다.

## 2. 축류팬 및 실험장치

본 연구는 저압 축류팬을 대상으로 하였으며, 상세한 사양은 Table 1에 수록하였다. 날개 끝단의 틈새는 2 mm (1.5 % 틈 코드)로 균일하며, 설계점에서의 유량계수  $\phi$  (축방향 속도를 날개 끝단의

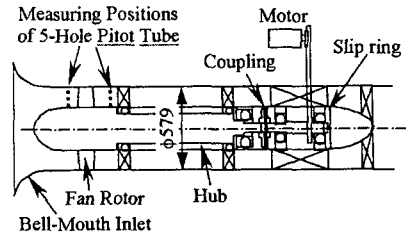


Fig. 2 Schematic view of experimental setup (units : mm)

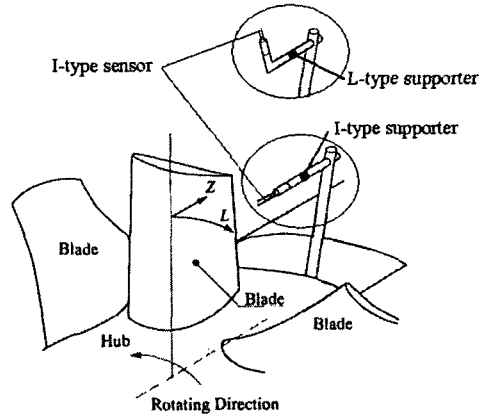


Fig. 3 Test blade measuring system

회전속도로 무차원화함) 및 전압계수  $\psi_t$  (날개 후연에서 전압을 동압으로 무차원화함)는 각각 0.41과 0.3이다. 본 실험팬은 외경이 287.5mm이며, NACA65계열의 익형을 사용하였다.

Fig. 1은 유량에 따른 축류팬의 소음 및 전압특성을 나타내고 있다. 소음은 축류팬의 설치 지점으로부터 1 m 상류측에서 측정하였다. 본 연구에서는 성능곡선 상에 표시한 바와 같이, 설계점을 포함하는 4 가지 유량 조건 ( $\phi = 0.28, 0.31, 0.41, 0.47$ )에서 익단누설와류의 특성을 연구하였다. 소음은 설계유량 조건에서부터 유량이 감소함에 따라 최대 압력점 ( $\phi = 0.31$ ) 근방까지는 크게 변화하지 않으나, 스톨 영역 ( $\phi = 0.28$ )에서는 크게 증가함을 알 수 있다. 축류팬의 설계방법 및 성능측정 방법에 대한 상세한 설명은 기 발표한 논문에서 기술하였다.<sup>(5)</sup>

축류팬 성능 실험장치의 구성도를 Fig. 2에 나타내었다. 즉, 벨마우스 입구, 팬 로터, 벨트에 의해 연결된 팬 구동모터 등으로 구성되어 있으며, 출구측에는 댐퍼 및 보조팬을 설치하였다.

날개 끝단에서 상대속도 및 속도섭동치를 분석하기 위하여, 웬 로터와 함께 회전하는 I형 열선 센서를 사용하여 익간에서 회전 로터에 대한 상대흐름을 측정하였다. 열선 센서는 직경이  $5\mu\text{m}$ 인 텅스텐 선으로 KANOMAX사의 정온도(constant temperature)형 열선풍속계를 사용했다. 또, 본 축류팬 로터를 포함하는 측정부 시스템을 Fig. 3에 나타내었다.

그림에서 이동 프로브(moving probe)의 끝단에 반경 방향으로 장착된 열선 센서는 허브 안에 설치된 이송장치의 컴퓨터 제어에 의해 축류팬 로터가 회전하는 도중에도 반경방향, 원주방향 및 축방향으로 이동할 수 있다. 센서의 출력은 MICHIGAN SCIENTIFIC CORPORATION사의 수은 슬립링을 통하여 측정용 컴퓨터에 전송되어, 자동 샘플링을 통하여 제반 통계량이 산출된다. 단, 슬립링을 통과한 데이터가 컴퓨터에 전송되기 전에 8.9 kHz이상의 주파수성분을 제거하기 위해 low pass filter를 사용하였다. I형 프로브의 검증(calibration)은, 케이스 내에 설치되어 있는 웬 로터를 제거한 상태에서 열선 센서를 수 단계의 회전수로 바꾸어 그때의 회전방향 속도를 이용하여 수행하였다. 속도 및 속도섭동값은 각각의 측정 위치에서 6000번의 샘플링 값을 평균하여 얻었으며, 속도섭동의 스펙트럼 분포는 ONOSOKKI사의 FFT분석기를 사용하여 각 측정 지점에서 64번 평균한 값으로 구하였다.

Fig. 3에서 보듯이, supporter에 장착된 I-type 열선 센서는 날개의 후연(trailing edge) 측에서 측정을 시작하여, 상류쪽으로 이동해 가며 상대속도를 측정한다. 날개의 부압면 근방 [후술하는 Fig. 4(a) 내의 "A" 부분]의 유동장을 측정할 때에는 Fig. 3의 I-type supporter로는 날개의 간섭으로 인하여 측정할 수 없기에, 본 연구에서는 L-type supporter를 이용하여 날개의 부압면 근방의 물리량을 측정하였다. 이때, 로터와 함께 회전 시 supporter의 차이로 발생하는 열선 센서의 변형량은 실험 전에 측정하여 보정하여 주었다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1 설계점 및 탈설계점에서의 익단누설와류의 특성

날개의 부압면 및 압력면을 포함하는 익간에서 익단누설와류 주위의 속도분포 및 속도섭동 값을 열선 센서를 이용하여 상세히 측정하여 익단누

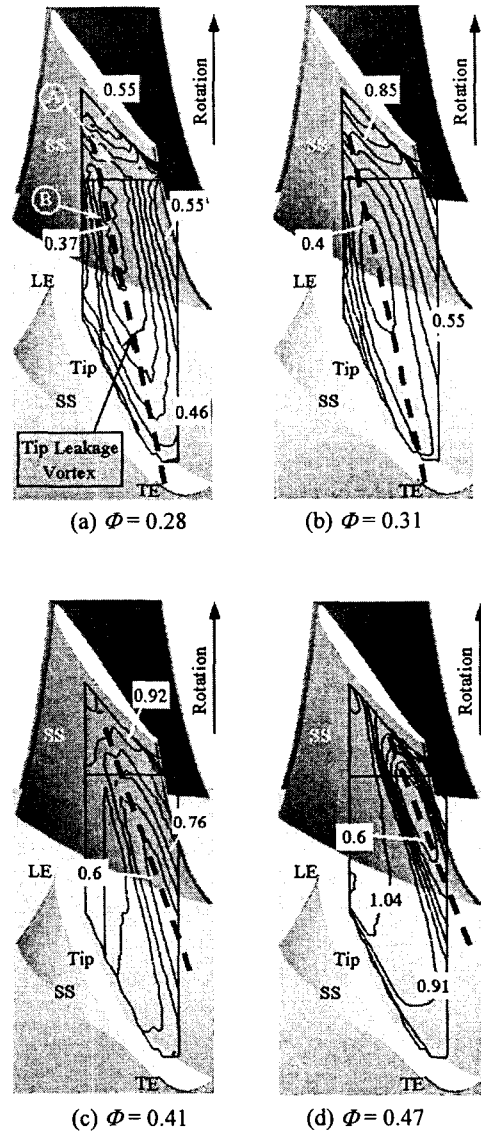


Fig. 4 Contour of relative velocity on the plane 96 percent span

설와류의 유량에 따른 특성을 고찰하였다.

Fig. 4는 96% 스패 면에서 설계점 및 3곳의 탈설계점 유량조건에서의 상대속도 분포를 나타내고 있다. 그림에서 익간 외측의 실선은 96% 스패 면에서의 측정영역을 나타내고 있다. Fig. 3에 나타냈듯이 날개의 부압면에서 L-type supporter를 이용하여 측정한 영역을 "A" (Fig. 4(a) 참조)로, 그 외의 I-type supporter를 장착하여 측정한 영역을 "B"로 각각 표시하였다. 96% 스패 면은 후술하는

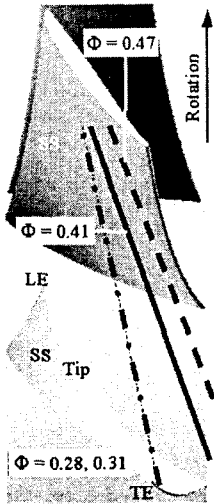


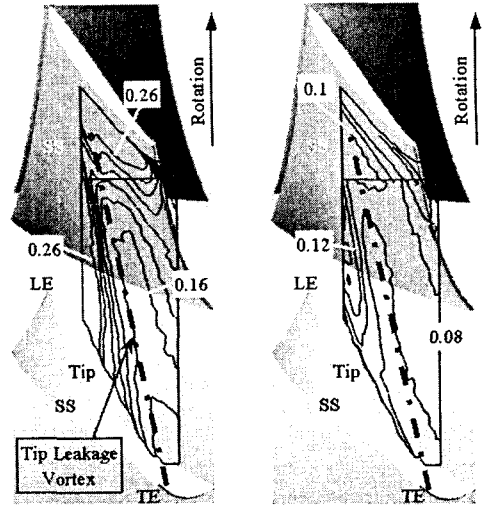
Fig. 5 Trajectory of the vortical center of the tip leakage vortex

Fig. 8 에서 보듯이, 4 곳의 유량조건에서 익단누설와류의 평균 중심점에 해당한다. 본 연구에서는 익단누설와류의 구조를 회전 열선 센서를 이용하여 상세히 측정하기 위하여, 예비실험을 통해 측정영역 및 간격을 결정하였다. 반경방향의 측정은 76 % 스패ن(255 mm)에서 98 % 스패น(285 mm)까지의 영역을 설정하였다. 축방향의 측정위치는 날개 끝단의 전연에서부터 상류측은 27%, 하류측은 121 % 팁코드 영역으로 하여서 각각 설정하였다. 회전방향의 측정 격자점 생성 시 익면에서 인접하는 측정점의 최소거리는 약 9mm 로 유지하였으며, 세 방향 모두 측정간격은 약 3mm 로 하였다. 실험에서 얻어진 상대속도  $V_{ar}$  는 날개 끝단의 회전속도  $U_t$  로 무차원하였으며, 다음과 같이 정의하였다.

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

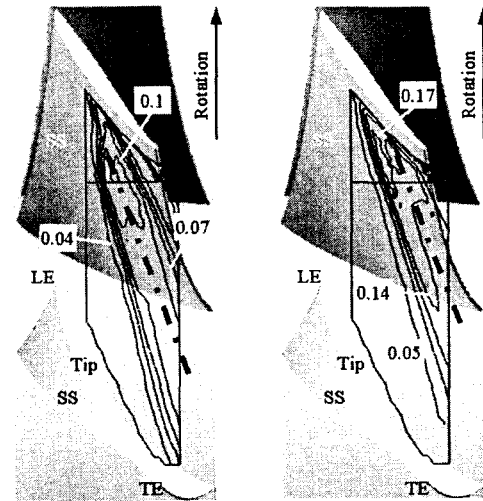
여기서,  $V_a$  및  $V_t$  는 각각 축방향 및 회전방향 속도를 나타낸다.

Fig. 4 에서 보듯이, 모든 유량조건에서 저속의 속도 골(velocity trough)이 형성되며, 이는 익단누설와류의 위치를 의미한다. 그림에서는 누설와류의 중심점을 점선으로 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이, 설계유량보다 저유량인 영역( $\Phi = 0.28, 0.31$ )에서는 부압면의 전연 부근에서 발생한 익단누설와류가 인접하는 날개 압력면과 간섭함을 알



(a)  $\Phi = 0.28$

(b)  $\Phi = 0.31$



(c)  $\Phi = 0.41$

(d)  $\Phi = 0.47$

Fig. 6 Contour of velocity fluctuation on the plane 96 percent span

수 있다. 설계유량조건( $\Phi = 0.41$ )에서는 누설와류가 인접하는 날개면과 간섭하지 않고 하류로 발달함을 알 수 있으나, 과대유량( $\Phi = 0.47$ ) 조건에서는 부압면의 후연쪽으로 발달함을 실험을 통해 알 수 있었다.

유량에 따른 익단누설와류 중심의 상대적인 위치를 Fig. 5 에 나타내고 있다. 즉, 유량이 증가함에 따라 누설와류의 발생점이 날개 부압면의 하류측으로 이동함을 알 수 있으며, 설계유량보다 적은 최대압력점과 스톨 유량조건에서는 인접하는

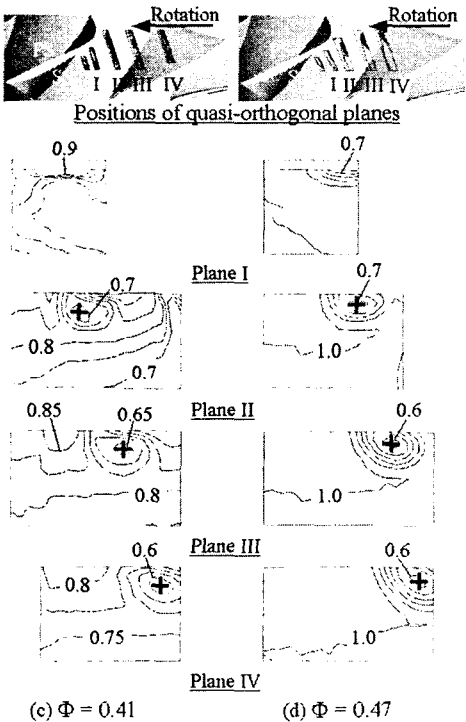
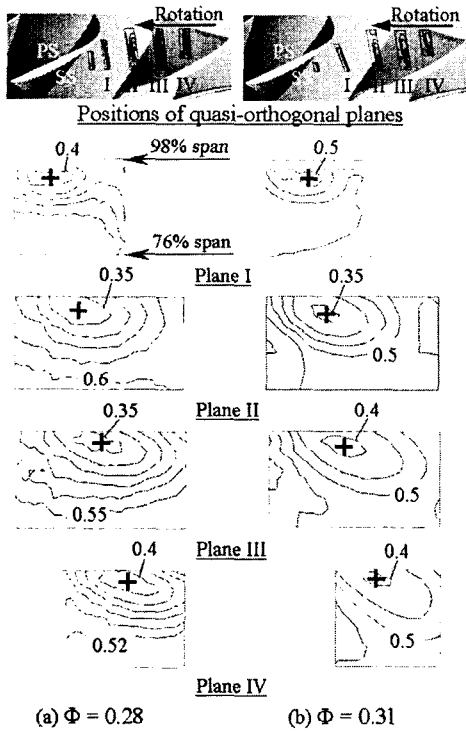


Fig. 7 Contour of relative velocity on the quasi-orthogonal plane to the tip leakage vortex

압력면과 간섭을 일으킴을 알 수 있다. 이러한 경향은 축류 압축기에 의 익단누설와류 특성과 경향이 잘 일치함을 알 수 있다.<sup>(1,3)</sup>

Fig. 6 은 Fig. 4 와 같은 방법으로 나타냈으며, 96 % 스팬 면에서 속도섭동치를 표시하고 있다. Fig. 6 에서 일점쇄선의 위치는 Fig. 4 의 점선과 대응하며, 익단누설와류의 중심을 의미한다. Fig. 4 에서 나타냈듯이, 익단누설와류가 인접하는 날개 압력면과 간섭하는 저유량 영역( $\Phi = 0.28, 0.31$ )에서는 높은 속도섭동치를 갖는 영역이 누설와류의 상류측과 하류의 부압면 근방에 분포하고 있음을 알 수 있다. 이것은 저유량조건에서 익단누설와류가 시간에 따라 익간내에서 크게 변동함으로써 누설와류와 주류(main flow)가 간섭하는 면에서 속도섭동이 크게 나타났기 때문이다. 누설와류가 날개의 압력면과 간섭을 일으킴으로써 압력면에 높은 속도섭동이 발생하게 되며 이로인해 Fig. 1 에서 나타냈듯이 익단와류에 의한 익단소음이 저유량 영역에서의 소음증가에 크게 기여하게 된다.<sup>(6)</sup> 한편, 설계유량( $\Phi = 0.41$ ) 및 과대유량( $\Phi = 0.47$ ) 조건에서는 상대적으로 큰 속도섭동치가 누설와류 주위에 분포하고 있음을 알 수 있다. Fig. 4 에서 알 수 있듯이, 저유량영역에서 발생하는 속도섭동치의 크기는 고유량 영역의 값보다 상대적으로 큰 값을 가짐을 알 수 있으며, 이는 또한 저주파수 영역에서의 소음 증가와 밀접한 관련이 있다고 보고 되었다.<sup>(6)</sup>

3.2 유량에 따른 익단누설와류 중심의 위치

부압면의 전연 부근에서 발생한 익단누설와류의 구조와 중심점의 위치를 상세하게 이해하기 위하여, 익단누설와류와 거의 직각을 이루는 준직교 단면을 설정하여 각 단면의 측정점에서 회전 열선 센서를 이용한 물리량 측정을 하였다.

Fig. 7 은 설계유량 및 3 곳의 탈설계점 유량조건에 대하여 익단누설와류에 준직교하는 4 개의 면상의 상대속도 분포를 나타낸 것이다. 각 단면에서의 측정방향 측정위치는 날개 끝단의 전연으로부터 최소 27 퍼센트에서 최대 121 퍼센트 팁코드 영역을 각각 설정하였다. 그림에서 최소 상대속도를 갖는 위치를 “+” 로 표시하였으며, 이는 누설와류의 중심을 의미한다. 상대적으로 낮은 속도분포를 갖는 익단누설와류는 주류에 대하여 저항(blockage)의 역할을 하며, 이 위치에서 압력손실이 크게 나타나는 것으로 알려져 있다.<sup>(9)</sup> 그림에서 보는바와 같이 축류팬에서는 날개 부압면에서 발생한 익단누설와류가 하류로 발달함에 따라 와류의

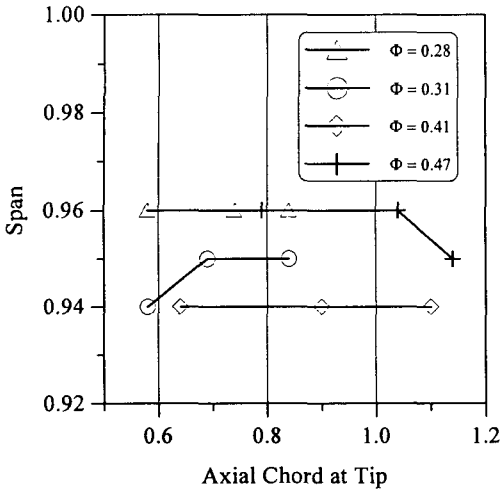


Fig. 8 Radial positions of the vortical center of a tip leakage vortex

크기가 증가함을 알 수 있다. 또, 과대유량조건에서[Fig. 7(d)]는 익단누설와류가 약 80 % 스펠영역까지 영향을 미치며, 유량의 증가와 함께 그 크기도 증가한다. 스톨유량 조건[Fig. 7(a)]에서는 75 % 스펠영역까지 주류에 영향을 끼침을 알 수 있다.

Fig. 8 은 축방향 코드길이에 따른 익단누설와류 중심의 반경방향 위치를 유량에 따라 표시한 것이다. 수평축은 날개 끝단의 전연에서부터 거리를 날개끝단의 축방향 코드길이 (= 57.6 mm)로 무차원하여 표시하였다. 즉, 값"1"은 날개 끝단에서의 후연의 위치를 의미한다. 익단누설와류 중심점은 전유량 영역에서 94 ~ 96 % 스펠에 위치하고 있음을 알 수 있다. 즉, 유량의 변화에 대하여 시간평균값으로 측정된 익단누설와류의 중심위치는 95 % 스펠을 중심으로 약 1 % 스펠 범위내에 존재함을 알 수 있다.

3.3 유량에 따른 날개 부압면 근방 주파수 특성

Fig. 9 는 4 곳의 유량점을 대상으로, 85 % 스펠 면에서 "O" 로 표시한 날개 부압면 근방의 측정점에서 속도섭동 값의 스펠트럼 분포를 나타내고 있다. 측정점의 축방향 간격은 3 mm 로 균일하며, 축방향의 측정위치는 Fig. 4 와 동일하다. 그림의 횡축은 주파수 Hz 를, 종축은 스펠트럼 밀도값  $S(f)$  을 각각 나타낸다. Fig. 9 에서 보듯이, 스톨 유량조건( $\Phi = 0.28$ )에서는 1 KHz 이하의 저주파영역에서 다른 유량조건에서와는 다르게 스펠트럼 밀도가

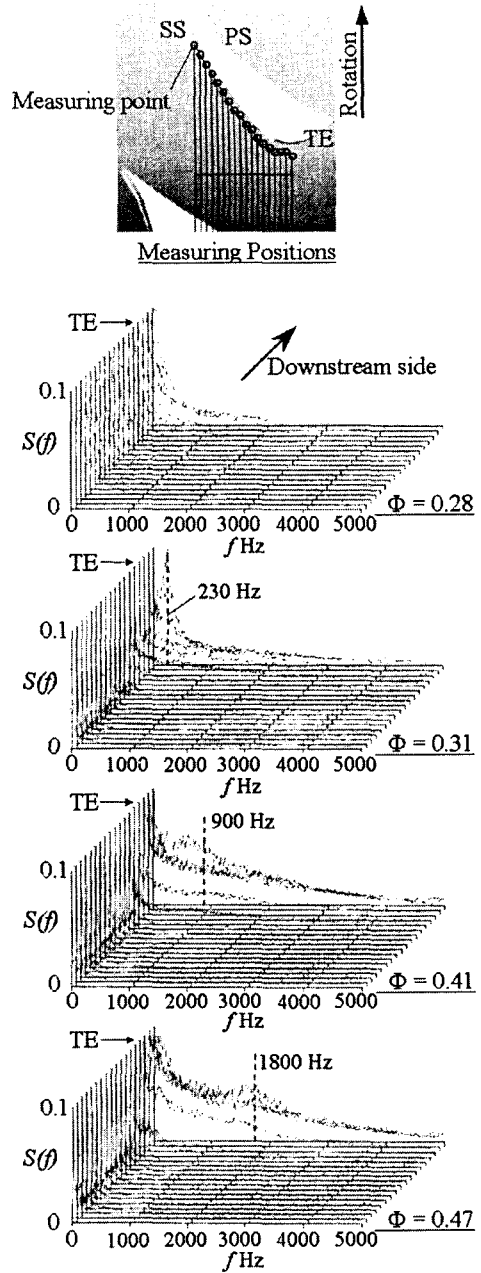
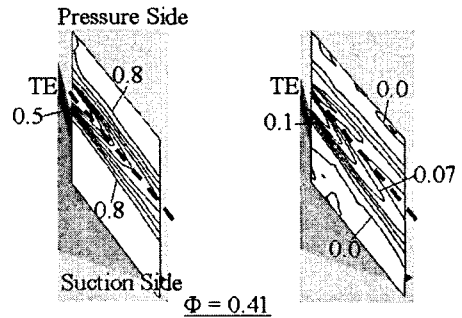
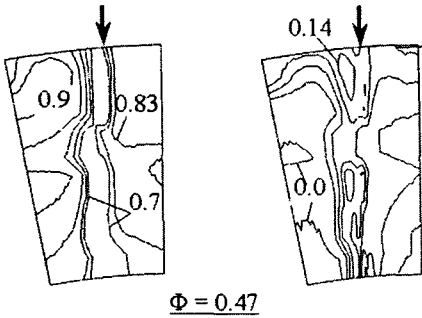
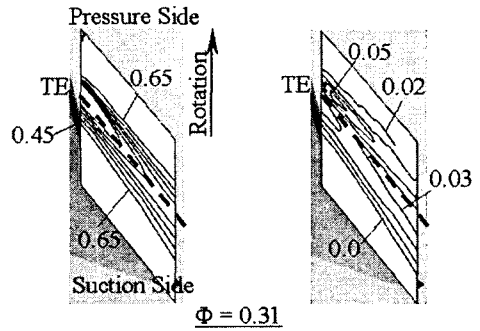
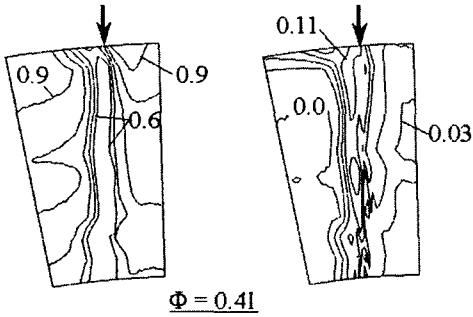
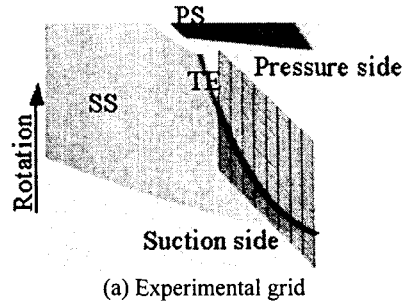
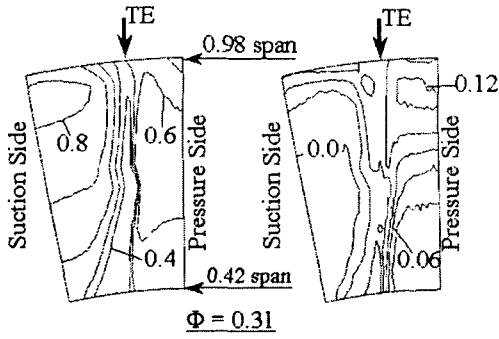


Fig. 9 Spectrum of velocity fluctuation at 85 percent span

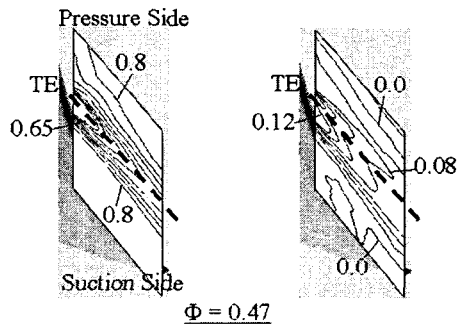
부압면을 포함하는 전 측정점에서 큰값을 갖음을 알 수 있다. 이는 스톨 유량조건에서 익단누설와류가 날개의 부압면에서 시간에 따라 크게 섭동(fluctuation) 한 결과이며, Fig. 6(a)에서 나타난 것과 같이 날개의 부압면에서 다른 유량조건과는



(a) Relative velocity (b) Velocity fluctuation

Fig. 10 Contour of relative velocity and velocity fluctuation in the wake region

다르게 큰 섭동치를 갖는것과 연관이 있다고 볼 수 있다. 최대압력유량( $\Phi = 0.31$ ) 조건에서는 날개의 후연 근방에 230Hz 의 피크 주파수(peak frequency)가 존재하는데, 이는 후류에서의 카르만 와류에 의한 주파수가 아니라 익단누설와류의 섭동 주파수이다.<sup>(5)</sup> 즉, 익단누설와류가 인접하는 부압면과 간섭을 일으킴으로써 누설와류의 섭동주파수가 강하게 나타난 것이다. 설계 유량보다 큰 유량에서는 날개의 부압면에서 스펙트럼 밀도값이 매우 작지만, 날개의 후연에서는 카르만 와류의 영향으로 피크 주파수를 동반하는 큰 스펙트럼 밀도값을 갖는다.



(b) Relative velocity (c) Velocity fluctuation

Fig. 11 Contour of relative velocity and velocity fluctuation on the plane of 68 percent span in the wake region

3.4 설계점 및 탈설계점에서 후류에 대한 익단 누설와류의 특성

Fig. 10은 스톨 유량조건을 제외한 3곳의 유량조건에 대하여 날개 후류측에서 스펠방향으로 상대속도 및 속도섭동치 분포를 나타낸 것이다. 열선 센서의 스펠방향 측정간격은 3mm로 균일 하며, 날개 후연에서부터 측정위치까지 축방향 거리는 3 mm이다. 최대압력유량( $\Phi = 0.31$ ) 조건에서는 Fig. 4(b)에서 나타낸 것과 같이 날개의 후연 근방에서 누설와류와 압력면과의 간섭에 의하여 95 % 스펠영역의 압력면에 높은 속도섭동치를 나타낸다. 반대로, 과대유량조건 ( $\Phi = 0.47$ ) 에서는 Fig. 4(d)에서와 같이 날개의 부압면과 누설와류가 간섭하기에 날개 끝단의 부압면측에 속도섭동치가 크게된다. Fig. 10(a)의 상대속도분포에서 보듯이, 설계유량과 과대유량조건에서는 전 스펠에 걸쳐 날개의 후연에 저속영역이 존재하나, 누설와류가 압력면과 간섭하는 저유량조건( $\Phi = 0.31$ )에서는 날개 끝단영역에서 간섭에 의한 저속류(wake flow)영역이 사라짐을 알 수 있다. 이는 팬이 저유량 조건에서작동할 때 후류에서 카르만 와류발생을 억제하는 효과로 나타난다.

Fig. 11은 68 % 스펠에서 축방향의 상대속도 및 속도섭동치를 나타낸 것이다. 날개 후연에서부터 축방향으로 3 ~ 30 mm 영역을 표시하였으며, 점선은 후류의 속도골의 위치를 나타낸다. 누설와류와 압력면의 간섭에 의해 저유량조건( $\Phi = 0.31$ )에서는 카르만 와류의 발생이 억제됨을 잘 확인할 수 있으며, 설계유량보다 큰 유량조건에서는 속도골의 양측에 카르만 와류에 의한 속도섭동치의 골을 확실하게 관찰할 수 있다. 이 카르만 와류에 의한 속도섭동치의 주파수는 1 ~ 2 KHz 영역에서 발생하는 것으로 알려져 있다.<sup>(5)</sup>

4. 결론

설계유량과 탈설계 유량조건에서 축류현 날개의 부압면 영역을 포함하는 전 익간영역 그리고 후류영역을 회전열선 센서로 측정하고, 흐름장 특성을 상세히 고찰하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 유량이 증가함에 따라 누설와류의 발생점이 부압면의 하류측으로 이동하며, 과대유량시에는 부압면측에 큰 속도섭동치를 야기시킨다.
- (2) 익단누설와류에 의한 속도섭동치는 유량의 감소와 함께 증가하며, 이는 저유량 영역에서의 소음증가에 기여한다.
- (3) 익단누설와류와 준직교 하는 단면에서 상대속도를 측정함으로써 익단누설와류의 구조 및 중심위치를 유량에 따라 분석하였으며, 중심점은 전 유량

조건에서 94~96 % 스펠에 위치함을 알 수 있었다.

(4) 스톨 유량조건에서의 날개의 부압면 근방에서는 1000 Hz 이하의 저주파를 갖는 큰 스펠트럼 밀도가 분포함을 알 수 있었다.

(5) 저유량 영역에서는 익단누설와류와 압력면의 간섭에 의하여 날개 후연의 끝단에서 후류(wake flow) 생성이 방해를 받으며, 이로 인해 카르만 와류 생성이 억제됨을 알 수 있었다.

후 기

본 연구에 있어서 실험을 도와준 일본 큐슈대학교(현재는 Ishikawajima-Harima Heavy Industries 재직)의 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) Fukano, T., Takamatsu, Y. and Kodama, Y., 1986, "The Effects of Tip Clearance on the Noise of Low Pressure Axial and Mixed Flow Fans," *J. Sound Vib.*, Vol. 105, pp. 291~308.
- (3) 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.
- (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 the KSME (B)*, Vol. 22, No. 3, pp. 336~345.
- (5) Jang, C.-M. and Kim, K. Y., 2003, "Frequency Characteristics of Fluctuating Velocity According to Flow Rates in a Tip Leakage Vortex and a Wake flow in an Axial Flow Fan," *Trans. of the KSME (B)*, Vol. 28, No. 2, pp. 181~188.
- (6) Fukano, T. and Jang, C.-M., 2004, "Tip Clearance Noise of Axial Flow Fans Operating at Design and Off-Design Condition," *J. Sound Vib.*, Vol. 275, pp. 1027~1050.
- (7) Inoue, M. and Furukawa, M., 2002, "Physics of Tip Clearance Flow in Turbomachinery," *ASME FEDSM 31184*, pp. 1~13.
- (8) 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.
- (9) Jang, C.-M., Furukawa, M. and Inoue, M., 2001, "Analysis of Vortical Flow Field in a Propeller Fan by LDV Measurements and LES- PART II: Unsteady Nature of Vortical Flow Structures due to Tip Vortex Breakdown," *Trans. ASME, J. Fluids Eng.*, Vol. 123, No. 4, pp. 755~761.