

## 5 공 피토관 및 회전 열선 유속계에 의한 축류 팬 내부 유동장 계측 및 평가

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

(2003년 7월 23일 접수, 2003년 10월 29일 심사완료)

Flow Measurements and Performance Analysis using a 5-Hole  
Pitot Tube and a Rotating Hot-Wire Probe in an Axial Flow Fan

Choon-Man Jang and Kwang-Yong Kim

**Key Words :** Axial Flow Fan(축류 팬), Rotating Hot-Wire Probe(회전 열선 프로브), 5-Hole Pitot Tube (5 공 피토관), Tip Leakage Vortex(익단 누설 와류), Velocity Fluctuation (속도변동)

### Abstract

This paper describes the flow measurements inside the blade passage of an axial flow fan by using a rotating hot-wire probe sensor from a relative frame of reference fixed to the rotor blades. The validity of fan rotor designed by a streamline curvature equation was performed by the measurement of the three-dimensional flow upstream and downstream of the fan rotor using a 5-hole pitot tube. The vortical flow structure near the rotor tip can be clearly observed by the measurements of a relative velocity and its fluctuation on quasi-orthogonal planes to a tip leakage vortex. Larger vortical flow, which results in higher blockage in the main flow, is formed according to decrease a flow rate. The vortical flow spreads out to the 30 percent span from the rotor tip at near stall condition. In the design operating condition, the tip leakage vortex is moved downstream while the center of the vortex keeps constant in the spanwise direction. Detailed characteristics of a velocity fluctuation with relation to the vortex were also analyzed.

### 1. 서 론

축류팬의 날개 선단부에 존재하는 익단 누설 와류(tip leakage vortex)는 팬의 성능에 중요한 영향을 주기 때문에, 지금까지도 많은 실험 및 수치해석적 방법에 의한 연구가 수행되어지고 있다.<sup>(1-7)</sup> 즉, 익단 누설 와류는 3 차원 비정상 특성을 갖으며, 유량조건에 따라 인접하는 날개 압력면 및 케이싱면과 간섭함으로써 높은 압력 변동을 가져와 팬의 중요한 소음원의 역할을 하는 것으로 알려져 있다.

Inoue 와 Kuroumaru<sup>(2,3)</sup>는 열선풍속계 등을 사용하여 축류 압축기 날개 선단의 누설와류를 실험적으로 해석하였다. 즉, 날개 틈새의 누설제트(leakage jet)와 날개 부압면 경계층의 전단면에 의해 생성된 누설와류는 익간에서 흐름방향에 따라 형성되며, 날개 틈새가 클수록 날개의 압력면에 접근한다고 보고하였다. Murthy 와 Lakshminarayana<sup>(5)</sup>는 LDV 를 이용하여 축류 압축기의 익간에서 누설와류의 궤적을 상세히 계측하였다. Foley 와 Ivey<sup>(6)</sup>는 LDV 및 피토관을 이용하여 다단 축류 압축기의 후류에서 누설와류의 거동을 측정하였다.

이상의 연구에서 보듯이, 로터 익간 유동을 측정하는 대부분의 연구는 회전하는 로터 익에 대하여 절대 좌표계 관점에서 수행한 것으로, 익단 누설 와류를 포함하여 시간평균 유동장 계측에는 유효한 방법이다. 그러나, 비정상 특성을 갖는 익단 누설 와류의 시간 변동을 측정하기 위해서는

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 인하대학교 기계공학과

E-mail : jangcm@munhak.inha.ac.kr

TEL : (032)860-7317 FAX : (032)868-1716

<sup>\*</sup> 인하대학교 기계공학과

Table 1 Design specifications of axial fan rotor

	Hub	Near Mid-Span	Tip
Radius (mm)	150.0	230.0	287.5
Chord Length (mm)	138.0	132.0	131.0
Camber	1.36	0.69	0.5
Solidity	1.32	0.83	0.65
Max. Thick/Chord (%)	10.0	8.8	8.0
Stagger Angle (deg)	35.3	56.5	63.9
Inlet Flow Angle (deg)	51.74	62.83	67.91
Outlet Flow Angle (deg)	26.13	55.03	64.03
Equivalent Diffusion Ratio	1.82	1.5	1.36

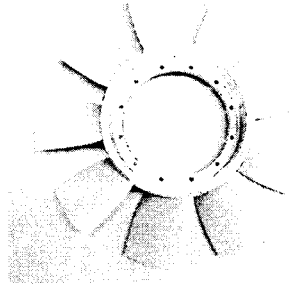


Fig. 1 Axial flow fan

회전하는 로터 익간의 유동장을 실시간으로 측정 가능한 상대 좌표계(즉, 로터와 함께 회전하는)에 의한 측정 방법이 반드시 필요하다. Fukano 등<sup>(8)</sup>은 회전하는 평판 익 후류 유동의 실시간 데이터를 로터와 함께 회전하는 열선 프로브를 로터 허브 내에 장착된 이송장치에 연결시켜 측정하였다. 이 측정 방법을 사용함으로써, 평판 익의 후방에서 생성되는 카르만 와류(Karman vortex)에 의한 주기적인 변동속도 값을 연구하였다.

본 연구에서는 축류팬의 로터 익간 유동장에 대해 상대 좌표계에서 측정할 수 있는 회전 열선 센서를 사용하여 시간평균 유동 특성 및 실시간 변동속도 값을 측정하였으며, 익단 누설 와류의 비정상 특성을 고찰하였다. 또한, 설계점 및 탈설계점에서 익단 누설 와류의 구조를 상세히 고찰하기 위하여 누설 와류와 직각을 이루는 단면에서 상대속도 및 그 변동치를 상세히 분석하였다. 마지막으로, 5 공 피토관에 의한 팬 로터 전후의 3차원 유동속도 계측을 통해 설계한 축류팬의 성능을 평가하였다.

## 2. 축류팬 사양 및 설계법

Fig. 1에 나타난 바와 같이 본 연구는 저압 축류팬을 대상으로 하였으며, 상세한 사양은 Table 1

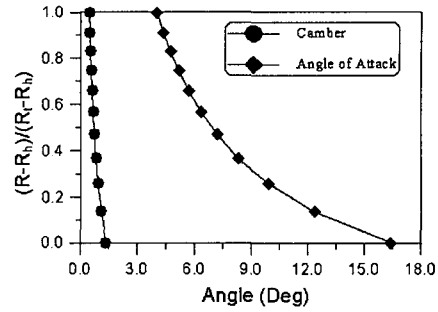


Fig. 2 Distribution of design parameters obtained from the Carpet diagram

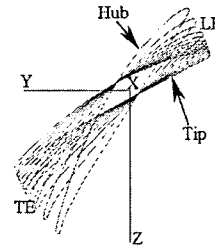


Fig. 3 Blade profile of the designed axial flow fan

에 수록하였다. 날개 선단의 틈새는 2 mm (1.5 % tip chord)로 균일하며, 설계점에서의 유량계수  $\Phi$  및 전압계수  $\Psi_t$ 는 각각 0.41 과 0.3 이다. 각 변수의 정의식은 다음과 같다.

$$\Phi = \frac{Q}{\pi(R_t^2 - R_h^2)U_t} \quad (1)$$

$$\Psi_t = \frac{2 \Delta P_t}{\rho U_t^2} \quad (2)$$

여기서,  $Q$ ,  $\Delta P_t$ ,  $U_t$ ,  $R_t$ ,  $R_h$  및  $\rho$ 는 각각 유량, 전압상승, 날개 선단의 원주방향 속도, 날개 선단 반경, 허브 반경 그리고 공기 밀도를 의미한다.

팬 설계에 있어서 자오면 유선은 유선곡률 방정식(streamline curvature equation)을 이용하여 계산하였다. 본 설계 팬은 NACA65 계열의 익형을 사용하였으며, Fig. 2에서 나타난 바와 같이 Carpet 선도를 이용하여 캠버(camber) 및 영각(angle of attack)의 분포를 결정하였다. Fig. 2에서 표시한 반경은 0 과 1 이 각각 날개 허브 및 선단을 의미한다. 한편, 설계 팬의 변수를 이용하여 익렬의 부하 한계를 상대적으로 평가하는 등가 확산비(equivalent diffusion ratio)는 Table 1에 나타난 바와 같이 전 반경 영역에서 손실이 급격히 증가하는 한계치, 2.0을 넘지 않음을 알 수 있다. 등가 확산비의 정의식은 다음과 같다.

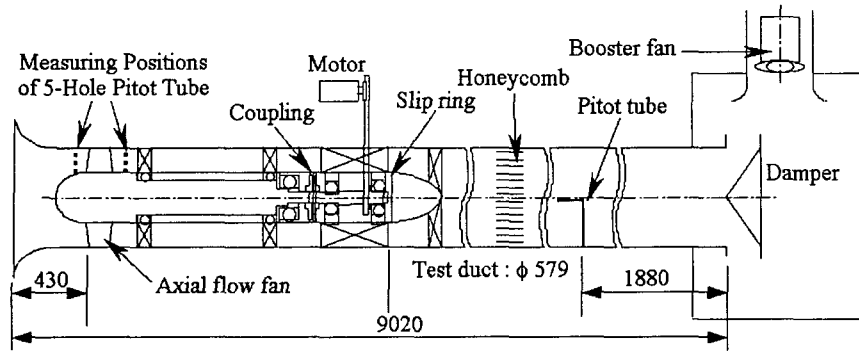


Fig. 4 Experimental setup (units:mm)

$$D_{eq} = \frac{\cos \beta_2}{\cos \beta_1} \left[ 1.12 + 0.61 \frac{\cos^2 \beta_1}{\sigma} (\tan \beta_1 - \tan \beta_2) \right] \quad (3)$$

여기서,  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  및  $\sigma$  는 유입각, 유출각 및 현절비(solidity)를 각각 나타낸다.

이상의 설계변수로부터 얻어진 설계 팬의 익형 단면을 Fig. 3 에 나타냈다. Fig. 3 에서, 원점은 NACA65 계열 익형의 stacking 위치를 나타낸다.

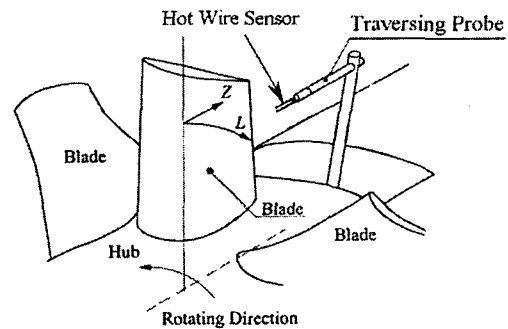


Fig. 5 Test blade measuring system

### 3. 실험 장치 및 방법

축류팬 성능 실험장치의 구성도를 Fig. 4 에 나타냈다. 즉, 벨마우스 입구, 웬 로터, 벨트에 의해 연결된 웬 구동 모터, 댐퍼 및 보조팬이 내경 0.579 m 의 원형 케이싱과 함께 구성되어 있다.

본 연구에서는 날개 선단 근방의 유동장을 상세히 조사하기 위하여, 웬 로터와 함께 회전하는 I 형 열선 프로브를 사용하여, 익간에서 회전 로터에 대한 상대 흐름을 측정하였다. 열선 센서는 직경이 5 $\mu$ m 인 텅스텐 선으로 정온도(constant temperature)형 열선 풍속계를 사용했다. 또, 본 축류팬 로터를 포함하는 측정부 시스템을 Fig. 5 에 나타내었다. 한편, 반경 방향을 향해 장착된 열선은 허브 안에 설치된 이송장치(traverse)의 컴퓨터 제어에 의해 축류팬 로터가 회전하는 중에도 반경 방향, 원주방향 및 축방향으로 이동할 수 있다. 이송장치의 최소 이동 거리는 0.3 mm 이며, 반경 방향 및 축방향의 최대 이동 거리는 각각 45 mm 및 60 mm 이다. 또, 회전방향으로는 회전축을 중심으로 50 도 범위에서 회전이 가능하므로, 익간 1 피치영역은 열선 프로브의 설정을 바꾸지 않고도 한번에 측정이 가능하다.

센서의 출력 데이터는 Fig. 4 에서 표시한 것과 같이 수는 슬립링(slip ring)을 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 을 사용하였다. 웬 로터의 회전수는 인버터에 의해 제어되며, 본 연구에서는 1000 rpm 일정으로 실험하였다. I 형 프로브의 검정(calibration)은, 케이싱 내에 설치되어 있는 웬 로터를 제거한 상태에서 열선 센서를 수단계의 회전수로 바꾸어 그때의 회전방향 속도를 이용하여 수행하였다. 또, 실험 시 열선 센서의 위치는 이것을 지지하는 지지대의 변형량을 실험에 앞서 측정하여 보정하여 주었다.

속도 및 변동속도 값은 각각의 측정 위치에서 6000 번의 샘플링 값을 평균하여 얻었다. 본 실험에서 얻은 속도성분 값은 시간 평균 속도값에 대하여 최대 5 퍼센트의 오차 값을 갖는다. 변동속도의 스펙트럼 분포는 ONOSOKKI 사의 FFT 분석기를 사용하여 각 측정 지점에서 64 번 평균한 값으로 구하였다.

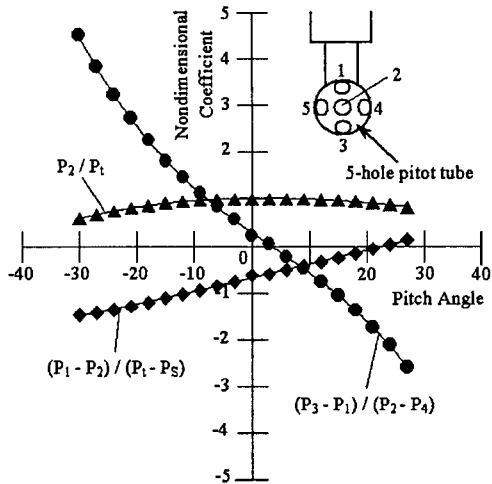


Fig. 6 Calibration curves of 5-hole Pitot tube

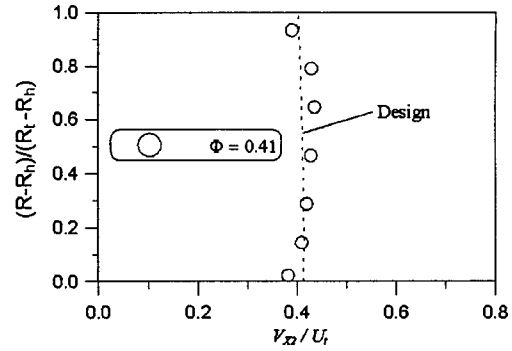
4. 결과 및 고찰

4.1 5공 피토관에 의한 팬 전후 유속계측 및 팬 성능 평가

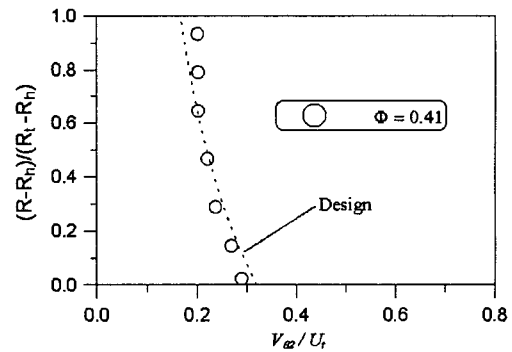
앞 절에서 기술한 바와 같이, 설계한 축류팬의 성능 평가를 위하여 팬 성능실험장치에 장착된 축류 팬의 상하류 측에 5공 피토관을 이용하여 3차원 속도분포를 측정하여, 팬 풍량에 따른 압력 상승 값을 구하였다. 5공 피토관은 측정부의 직경이 3.6 mm, 압력 측정 파이프의 직경은 0.7 mm로 하여 설계 제작하였다.

5공 피토관의 검정은 포텐셜 코어(potential core)경이 50 mm 인 별도의 검정용 풍동에서 수행하였다. 풍동 코어부의 제트 속도 값은 20 m/s 이며, 검정 결과는 Fig. 6 에 나타났다. 그림에서 P<sub>1</sub> 에서 P<sub>5</sub> 는 5공 피토관을 이용하여 측정한 압력 값이다. 또, P<sub>i</sub> 와 P<sub>s</sub> 는 검정용 풍동에서 프란틀(Prandtl) 피토관을 이용하여 측정한 전압 및 정압을 각각 나타낸다.

설계 유량( $\Phi=0.41$ )에 대하여, 팬의 하류측에서 5공 피토관으로 측정한 축방향 및 회전방향의 속도 분포를 Fig. 7 에 나타냈다. 날개 후연(trailing edge)에서 5공 피토관의 측정점 사이의 거리는 200 mm (150 percent tip chord, Fig. 4 에 측정위치 표시함)로 하였다. 그림에서 축방향 속도  $V_{x2}$  및 회전방향 속도  $V_{\theta 2}$  는 날개 끝단의 회전방향 속도  $U_t$  로 무차원화하여 표시하였다. 또, 점선은 팬 설계 시 사용한 설계값의 분포이다. 반경방향으로의 삼차원 속도 측정은 팬 실험장치에 5공 피토관을 장착한 후, 먼저 5공 프로브의 두 곳(Fig. 6 의 P<sub>4</sub> 와 P<sub>5</sub>)의 압력 값이 같은 조건이 되도록 프로브



(a) Axial velocity



(b) Tangential velocity

Fig. 7 Distribution of an axial velocity and a tangential velocity downstream of the fan rotor

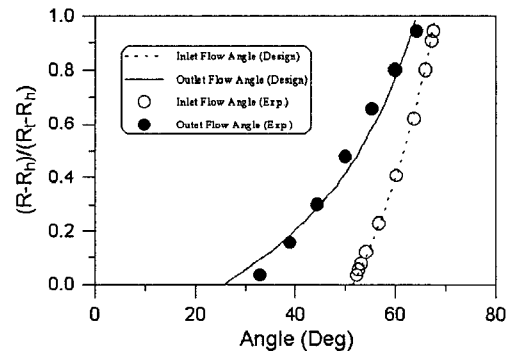


Fig. 8 Distribution of relative flow angle upstream and downstream of fan rotor

각도를 조정하였다. 그리고, 각 점의 압력값을 계측한 다음 검정곡선을 이용하여 각 속도 성분치를 결정하였다. 그림에서 보듯이 축방향 및 회전방향 속도는 설계유량 조건에서 설계값과 잘 일치함을 알 수 있다.

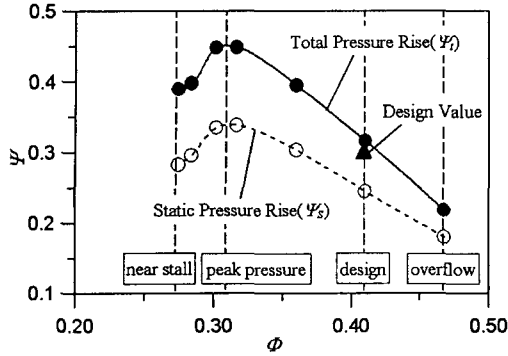


Fig. 9 Fan performance

설계유량에서 팬의 상류 및 하류에서의 상대 입출구각 분포는 Fig. 8 에 표시하였다. 날개 전연 (leading edge)으로부터 5 공 피토판 사이의 거리는 55 mm (42 percent tip chord, Fig. 4 에 측정위치 표시함) 이다. 상대 입출구각은 각 반경의 측정점에서 측정된 축방향 및 회전방향 속도를 이용하여 결정하였다. 그림에서 점선과 실선은 설계치를 의미하며, 성능에 중요한 인자인 유출입각의 분포는 설계치와 잘 일치함을 알 수 있다. 이상으로 축류팬의 설계조건은 실제 운전시에도 잘 일치함을 실험적으로 확인할 수 있었다.

Fig. 9 는 5 공 피토판으로 팬의 상류 및 하류 측에서 측정된 3 차원 속도 분포로 본 연구대상 축류팬의 성능곡선이다. 그림에서 실선으로 연결된 검은점과 점선으로 표시한 흰점은 각각 유량에 따른 전압 상승 및 정압 상승 분포를 나타낸다. 또, 그림에서 검은 삼각형은 설계시의 전압 상승치를 의미하며, 설계유량(φ=0.41)에서 얻은 실험치와 유사함을 알 수 있다.

4.2 유량에 따른 익단 누설와류의 특성

본 연구에서는 익단 누설와류의 유량에 따른 특성을 이해하기 위하여, 회전 열선 센서를 사용하여 날개 선단부위 유동을 상세히 측정하였다. 즉, Fig. 9 의 성능곡선에서 표시한 것과 같이, 설계점을 포함하는 네가지 다른 유량 조건(φ=0.28, 0.31, 0.41 and 0.47)에서 익단 누설 와류의 구조를 검토하였다.

열선 센서를 이용한 익단 내부유동 측정 격자점은 Fig. 10 에 나타났다. 본 그림은 날개 후방의 상단에서 본 그림으로, 설계 유량에서 열선 센서에 의해 측정된 저속 영역을 함께 표시하고 있다. 반경 방향의 측정은 76% 스펠(255 mm)에서 98% 스펠(285 mm)까지의 영역을 설정하였으며, 측정

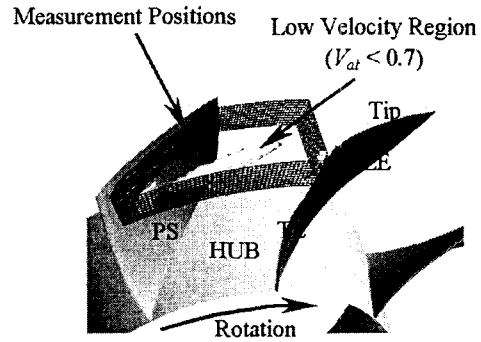


Fig. 10 Experimental grid in the blade passage

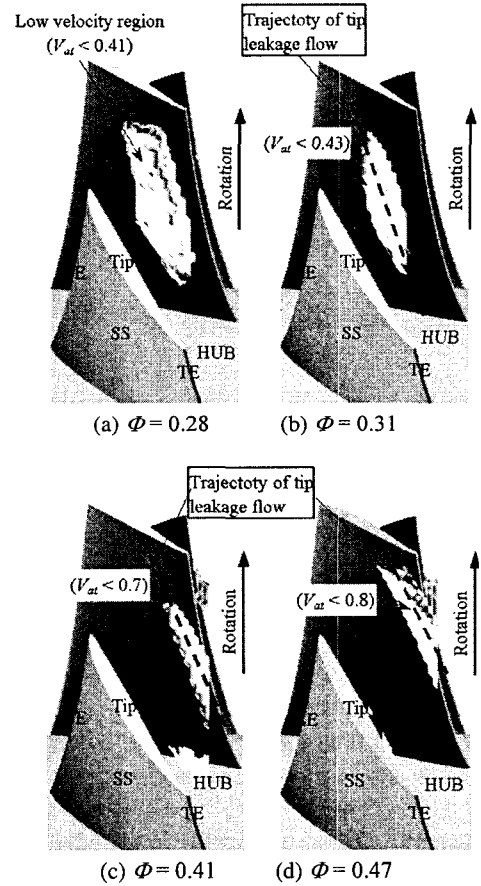


Fig. 11 Low velocity (tip leakage flow) region in a design and off-design conditions

간격은 약 3 mm 로 하였다. 반경 방향 및 축 방향의 측정 격자 수는 각각 21 개 및 11 개점으로 하였으며, 회전방향의 측정점은 반경 및 회전방향 위치에 따라 19 개에서 40 개로 선정하였다. 또, 날개 익면에서부터 열선 센서의 최소 측정 거리는

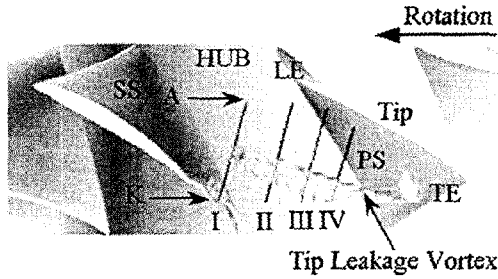


Fig. 12 Four quasi-orthogonal measuring planes to the tip leakage vortex ( $\Phi=0.41$ )

8.9 mm 로 하였다. 실험에서 얻어진 상대속도  $V_{at}$  는 날개 끝단의 회전속도  $U_i$  로 무차원하였으며, 다음과 같이 정의하였다.

$$V_{at} = \frac{\sqrt{V_a^2 + V_t^2}}{U_i} \quad (4)$$

여기서,  $V_a$  및  $V_t$  는 각각 축방향 및 회전방향 속도를 나타낸다. 설계 유량에서의 저속도 영역 ( $V_{at} < 0.7$ ) 은 Fig. 10 에 나타나 있으며, 익간의 날개 끝단 영역에서 나타나는 저속 유체는 익단 누설 와류를 의미한다.<sup>(9)</sup>

설계점 유량 및 세 곳의 탈설계점 유량조건에서 날개 끝단의 저속 영역 분포를 Fig. 11 에 나타냈다. 그림에서 점선은 익단 누설 와류의 궤적을 의미한다. 단, 그림에서 저속 영역의 스케일은 서로 다른 값을 갖는다. 그림에서 보듯이 설계유량 ( $\Phi=0.41$ ) 및 설계 초과 유량조건 ( $\Phi=0.47$ )에서는 날개의 부압면에서 생성된 익단 누설 와류가 인접하는 압력면과 간섭없이 후류 쪽으로 흘러감을 알 수 있다. 그러나, 유량이 감소함에 따라 익단 누설 와류는 상류로 이동하며, 저 유량 조건 ( $\Phi=0.31, 0.28$ )에서는 인접하는 압력면과 간섭함을 알 수 있다.

또한, 저속 영역(익단 누설 와류)은 풍량이 감소함에 따라 증가하여 익간에 큰 저항체(blockage) 역할을 함을 알 수 있다. 특히, 실속(stall)유량 조건에서는 이 저속영역이 크게 팽창하여 인접하는 압력면의 전연부터 후연까지 전영역에서 간섭함을 알 수 있다. 이렇듯, 주류(main flow)에 대해 저항체 역할을 하는 익단 누설와류는 익간에서 압력손실을 야기시키며, 이는 팬의 성능 저하를 가져온다. 본 연구에 사용한 축류팬에서는, 날개 끝단에서 스펠 방향으로 최대 30% 스펠 영역까지 저속 영역이 존재함을 알 수 있었다.

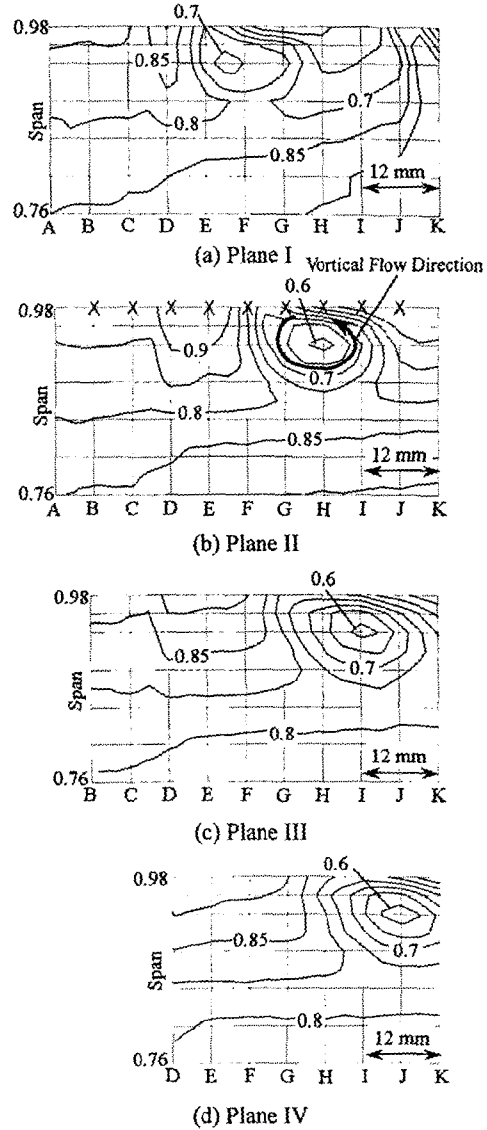


Fig. 13 Contour of relative velocity on the quasi-orthogonal planes to the tip leakage vortex ( $\Phi=0.41$ , interval of contour lines = 0.05)

### 4.3 설계점에 있어서 익단 누설와류의 상대속도 및 변동속도 분포

축류팬의 설계점에서 익단 누설와류 주위의 속도 및 그 변동치의 특성을 이해하기 위하여, 익단 누설와류와 직각을 이루는 4 개의 단면을 설정하여 각각의 단면에서 회전 열선 센서를 이용하여 상세한 물리량 측정을 하였다. 익단 누설와류에 준 직교하는 법선을 Fig. 12 에 표시하였으며, 본 그림은 날개의 팁에서 허브를 향해 본 것이다.

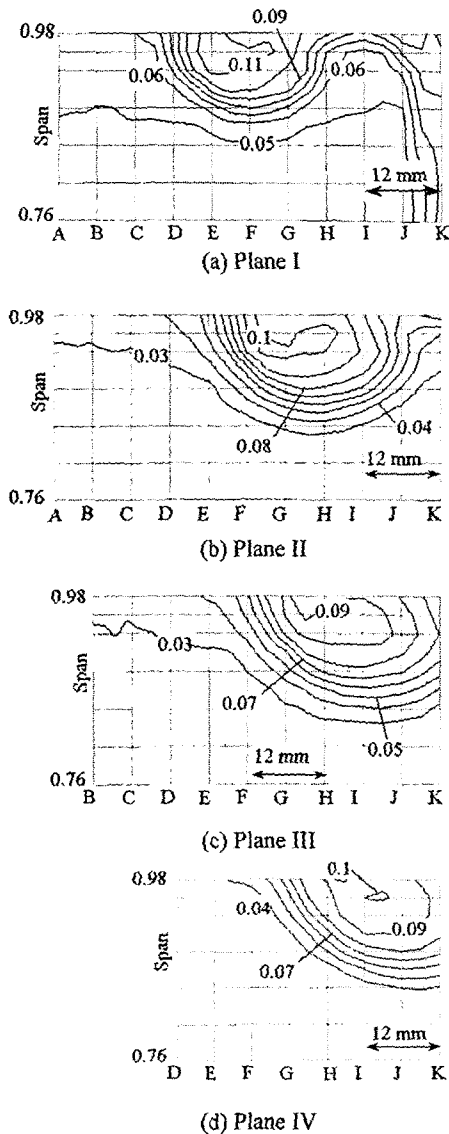


Fig. 14 Contour of velocity fluctuation on the quasi-orthogonal planes to the tip leakage vortex ( $\Phi = 0.41$ , interval of contour lines = 0.01)

각 준 직교 단면에서의 측정 좌표점과 상대속도는 Fig. 13에 표시하였다. 그림의 횡축에서 위치 "A" 및 "K"는 익단 누설 와류를 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. 13(a)에서 알 수 있듯이, 익단 누설 와류에 준 직교하는 면상의 측정점간 거리는 6 mm이며, 날개 선단에서는 반경방향으로 3 mm로 간격을 촘촘이 두어 측정점을 설정하였다.

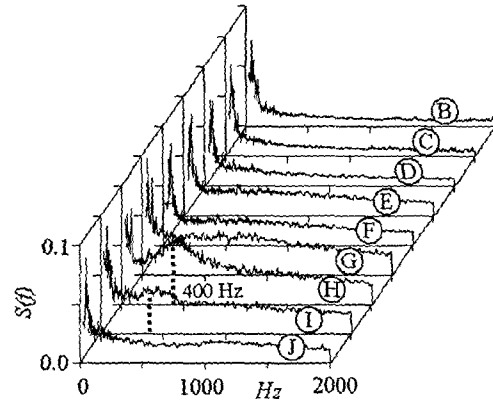


Fig. 15 Spectrum of velocity fluctuation at 0.98 percent span of Plane II in Fig. 13

웬 로터와 함께 회전하는 회전 열선 센서를 이용하여 익단 누설 와류와 준 직교한 면에서 측정된 상대속도분포로부터 각 단면에서의 익단 누설 와류의 위치 및 크기를 정확히 파악할 수 있었다. 즉, 익단 누설 와류는 하류로 이동함에 따라 그 중심은 반경 방향으로 약 0.94 스패스에서 일정하며, 그 와류의 크기는 와류의 확산(diffusion)에 의해 점점 증가함을 알 수 있다.

또, Fig. 13(b)에 회색 영역으로 표시한 영역은, 삼차원 수치해석 결과<sup>(10)</sup>에서 확인 할 수 있듯이 역류 영역을 나타낸다. 이 역류 영역에 존재하는 반경류는 케이싱 면과 직접적으로 간섭하여, 케이싱면에 소음에 중요한 영향을 주는 압력변동 값을 가져다 줄 수 있다고 사료 된다.

Fig. 14는 Fig. 13의 준직교면에 대응하는 면에서 변동속도 값의 실험 결과를 나타낸다. 각 단면의 그림에서 알 수 있듯이, 변동속도 값은 설계유량 조건에서 익단 누설 와류의 중심뿐만 아니라, 익단 누설 와류와 주류가 간섭하는 경계면에서 주로 큰 값을 갖음을 알 수 있다.

Fig. 13(b)의 98%스팬에 x로 표시한 측정점에서 변동속도 값의 스펙트럼 분포를 Fig. 15에 표시하였다. 그림의 횡축은 주파수 Hz를, 종축은 스펙트럼 밀도값  $S(f)$ 을 각각 나타낸다. 그림에서, 역류가 존재하는 영역의 스펙트럼값에서는 400 Hz 근방에서 피크 주파수(peak frequency)가 생성됨을 알 수 있다. 이상에서와 같이, 웬 로터와 함께 회전하며 실시간으로 상대속도의 변동 값을 계속할 수 있는 회전 열선 센서에 의한 익단 유동장 계속 기법은 익단 누설 와류의 속도 및 변동속도값 분포뿐만 아니라 그 변동의 스펙트럼도 충분한 분해능으로 계속할 수 있음을 확인할 수 있었다.

## 5. 결 론

## 참고문헌

저압 축류웬의 설계점 및 탈설계점 작동조건에 대해 열선 센서를 날개에 고정된 상대 좌표계 관점에서 익간 흐름을 상세히 측정하여, 익단 누설 와류에 대한 정상 및 비정상 유동 특성을 고찰하여 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 실험웬과 직경이 동일한 원형관 형태의 웬 성능 실험 장치에서, 5 공 피토관을 사용하여 웬 로터 전후에서 속도분포를 측정하여 작성한 유량에 따른 웬 성능곡선은 설계치와 좋은 일치를 보였다.

(2) 설계점보다 작은 유량 영역에서는, 유량이 감소함에 따라 누설와류는 상류로 이동하며 인접하는 압력면과 간섭한다. 또한, 누설와류는 풍량이 감소함에 따라 그 크기가 증가하여 익간에 큰 저항체 역할을 하며 웬 성능의 저하를 가져온다.

(3) 설계 조건에서, 누설와류는 하류로 이동함에 따라 그 중심이 반경 방향으로 일정하게 유지되며, 그 크기는 와류의 확산에 의해 점점 증가한다.

(4) 누설와류의 하류 상단부에는 역류 영역이 존재하며, 이 역류영역에서 발생하는 반경류는 케이싱 면과 직접적으로 간섭하여, 케이싱면에 소음에 중요한 영향을 주는 압력변동 값을 가져다 줄 수 있다고 사료된다.

(5) 변동속도 값은 설계유량 조건에서 누설 와류의 중심 뿐만 아니라, 누설 와류와 주류가 간섭하는 경계면에서 주로 큰 값을 갖으며, 피크 주파수는 역류 영역에서 발생한다.

## 후 기

본 연구에 있어서 조언을 주신 일본 큐슈대학의 후카노 교수님과 나가사키대학의 Hayashi 교수님께 깊은 감사를 표합니다.

- (1) Hah, C., 1986, "A Numerical Modeling of Endwall and Tip-Clearance Flow of an Isolated Compressor Rotor," *ASME J. Eng. for Gas Turbines and Power*, Vol. 108, pp. 15~21.
- (2) Inoue, M., Kuroumaru, M., and Fukuhara, M., 1986, "Behavior of Tip Leakage Flow Behind an Axial Flow Compressor Rotor," *Trans. ASME, J. Gas Turbine and Power*, Vol. 108, pp. 7~13.
- (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) Furukawa, M., Inoue, M., Saiki, K., and Yamada, K., 1999, "The Role of Tip Leakage Vortex Breakdown in Compressor Rotor Aerodynamics," *Trans. ASME, J. Turbomachin.*, Vol. 121, pp. 469~480.
- (5) 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.
- (6) Foley, A. C., and Ivey P. C., 1996, "Measurement of Tip-Clearance Flow in a Multistage, Axial Flow Compressor," *ASME J. Turbomachin.*, Vol. 118, pp. 211~217.
- (7) 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. KSME B*, Vol. 22, No. 3, pp. 336~345.
- (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., 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. JSME B*, Vol. 68, No. 673, pp. 2460~2466.
- (10) Jang, C.-M., Fukano, T., and Furukawa, 2003, "Effects of the Tip Clearance on Vortical Flow and Its Relation to Noise in an Axial Flow Fan," *JSME Inter. J.*, Vol. 46, No. 3, pp. 356~365.