

축류형 유체기계의 익단와류 측정 사례

장 춘 만*

1. 서 언

본 해설에서는 축류형 유체기계 (송풍기 및 압축기) 를 대상으로 익단와류 (tip vortex)의 측정기술 및 연구 사례를 소개하고자 한다. 일반적으로 케이싱과 로터 끝단의 틈새에서부터 생성되는 익단누설와류 (tip leakage vortex)는 비정상 (unsteady), 3차원 특성을 갖으며 날개 끝단에서 큰 압력손실을 가져오고, 이로 인해 유체기계의 성능저하 및 소음발생에 중요한 역할을 한다.

실계유량조건에서의 익단누설와류는 Fig. 1 에 나타냈듯이, 날개 끝단의 압력면과 부압면에서의 압력차로 인하여 날개의 틈새 (tip clearance)에서 발생한 누설 제트 (leakage jet)가 주류 (main flow)와 간섭을 일으킴으로써 생성된다. 즉, 이 간섭면에 와류시트 (vortex sheet)가 형성되며, 부압면의 경계층에 의해 와류의 말림 (rolling-up)이 시작되게 된다. 익단누설 와류는 익간 및 후류측에서 잘 관찰할 수 있으며, 작동유량조건, 틈새간격 및 날개의 형상에 따라 그 특성이 조금씩 다르게 나타난다. 익단누설와류의 시작점은 날개끝단의 최소압력점 근방이며, 케이싱면의 최소압력점을 나타내는 압력골을 따라 발달하는 것으로 알려져 있다.

축류형 유체기계에 있어서 익단누설와류는 지금까지 많은 실험 및 해석적 방법에 의하여 연구가 이루어져 왔다. 축류형 유체기계와 같이 로터가 회전하는 경우의 익간유동측정은 회전로터에 대하여 절대흐름관점에서 측정하는 방법과 측정센서가 회전로터와 함께 회전하며 흐름장을 측정하는 상대흐름 측정방법으로 대별 할 수 있다. LDV (Laser Doppler Velocimetry) 나 PIV (Particle Image Velocimetry)를 이용하여 익간 내부를 측정하는 방법이 전자에 해당하며, 열선 센서 (hot wire sensor) 및 5공 피토티트 프로브 (5-hole pitot probe)를 이용하여 로터와 같이 회전하며 측정

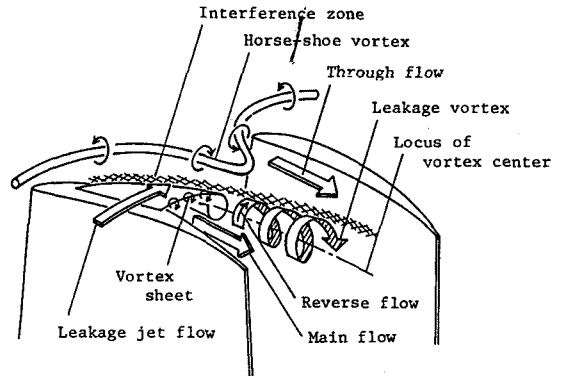


Fig. 1 Illustration of vortical flow structure near rotor tip of axial compressor

하는 방법이 후자에 해당한다. 회전하는 로터 익에 대하여 절대 흐름관점에서 유동장 특성을 측정하는 방법은 익단 누설와류를 포함하여 시간평균 유동장 계측에는 유효하다. 그러나, 3차원, 비정상 (unsteady) 특성을 갖는 익단누설와류의 비정상 특성을 효과적으로 측정하기 위해서는 로터와 함께 회전하며 상대흐름을 측정함으로써, 익단누설와류를 포함하는 흐름의 속도섭동값 또는 속도섭동에 의한 주파수를 측정 할 수 있다.

이상에서 설명하였듯이, 축류형 유체기계의 날개 끝단의 와류흐름을 중심으로 내부유동의 절대 및 상대흐름 측정에 의한 연구사례를 살펴보기로 한다.

2. 절대흐름 측정에 의한 익단와류 측정

2.1 열선 센서에 의한 익단누설와류 측정

먼저, 축류압축기에서 익단누설와류를 측정하기 위하여 열선 센서를 로터의 끝단과 케이싱 사이의 틈새에 장착하여 절대흐름을 측정할 사례⁽¹⁾를 소개한다. 본 연구에서는 틈새의 스팬방향 간격이 0.5~5 mm인 저속 축류압축기를 대상으로 하였으며, 틈새의 흐름을 측정하기 위하여 사용한 열선센서의 고정을 위하여

* 인하대학교 기계공학과
E-mail : jangcm@munhak.inha.ac.kr

Fig. 2에서와 같이 케이싱에 열선 프로브의 고정장치를 설치하였다. 틸새가 0.5~1 mm 까지는 설치공간의 제약으로 I형 센서를 사용하여 2차원 속도를 측정하였으며, 30도 경사진 I형 센서를 사용하여 삼차원 속도를 측정하였다. 회전날개에 대하여 위상을 고정한 phase-locked 흐름을 얻기 위하여 주기적다점검출법 (periodic multisampling method)을 사용하였다.

Fig. 3에 나타낸 것과 같이, 주기적다점검출법은 로터에 부착된 센서에 의해 전송된 동기신호(T.S.)에서 주기(T)를 산출한다. 이 주기에 의해 동주기의 타이밍펄스(T.P.)을 발생시키고, 이 T.P.를 base로한 원주

방향 측정점 수와 동수의 N개의 스케닝펄스(S.P.)를 로터의 회전주기의 L등분에 상당하는 간격으로 발생시킨다. 이 N개의 S.P.는 상대측정위치 P_1, P_2, \dots, P_N 에 대응한다. 이 S.P.의 신호로 열선출력을 sampling 함으로써 1회전에 N개의 측정위치에 대한 출력을 검출해 측정한다. 통계적으로 충분한 데이터 확보를 위하여, N개의 측정점의 출력을 수백회전에 걸쳐 측정할 필요가 있으며, S.P.가 측정점에 정확히 대응하는 것이 중요하다. 여기서, T.P.의 간격을 기본 클럭펄스에 의해 측정해서 S.P.의 간격을 조정하고 N개의 데이터를 읽어들이는 후 체크펄스(C.P.)를 발생시켜 시간적으로 발생하는 오차를 확인한다.

흐름장에서 역류가 발생할 경우에는, 열선 센서를 이용하여 속도를 측정하는 것이 불가능하므로 Fig. 4와 같이 간섭체(interference block)를 갖는 열선 센서를 이용하여 개략적으로 유속방향을 정한 후 흐름장을 측정한다.

Figs. 5와 6은 두개의 서로 다른 틸새간격에서의 상대속도 및 난류강도를 나타낸다. 본 실험에서는 날개에 대하여 절대속도를 측정하지만, 측정 후에 회

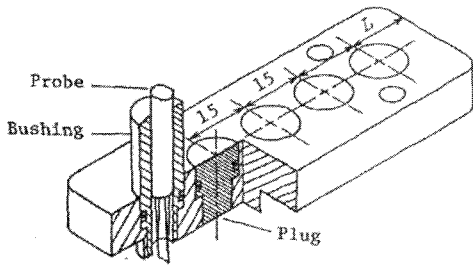


Fig. 2 Schematic view of a hot-wire probe setting device

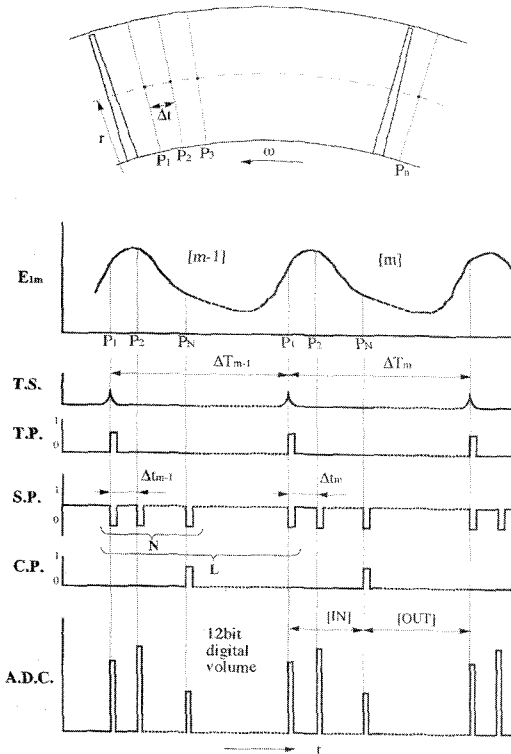


Fig. 3 Periodic multisampling method

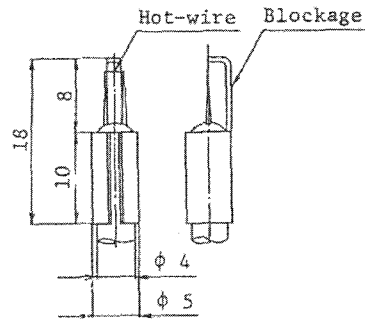


Fig. 4 Hot-wire with an interference block

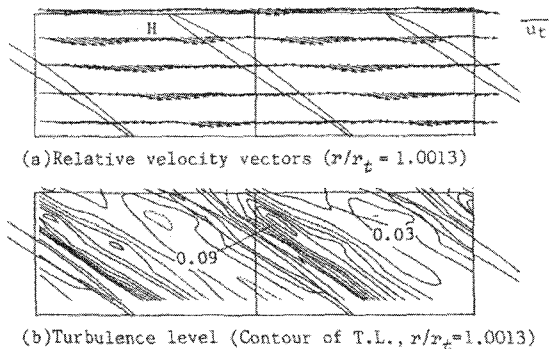


Fig. 5 Phase-locked flow pattern at the tip clearance of 0.5 mm

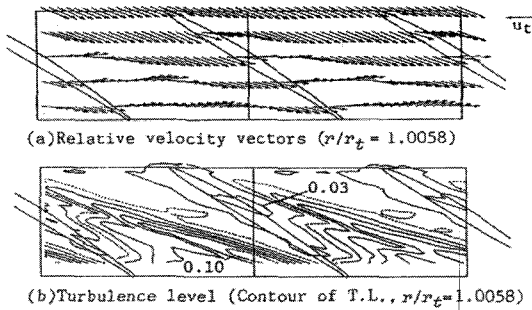


Fig. 6 Phase-locked flow pattern at the tip clearance of 3.0 mm

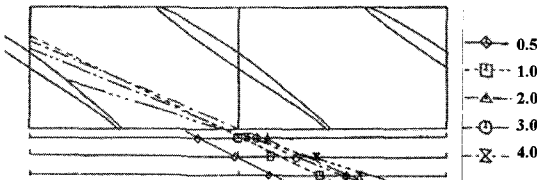


Fig. 7 Loci of vortex center

전속도를 제외하여 상대속도로 나타내고 있으며, 그림을 통하여 개략적인 익단누설외류의 중심위치를 알 수 있다. 그러나, 날개 틈새에서의 측정만으로는 익단누설외류의 상세한 분석은 한계를 가지고 있다.

Fig. 7은 5개의 틈새조건에서 외류중심의 위치를 나타낸다. 중심선은 열선센서를 이용하여 날개 틈새에서 측정된 상대속도를 이용하였으며, 흐름의 운동에너지가 최소값을 갖는 위치에 상당한다. 익단누설외류의 발생점은 틈새간격이 증가함에 따라 하류로 이동하며, 그 위치는 회전방향으로 이동함을 알 수 있다.

이상에서 관찰하였듯이, 날개의 틈새에서 열선센서로 측정된 절대속도를 통하여 익단누설외류의 중심위치를 잘 파악할 수가 있음을 알 수 있다.

2.2 LDV에 의한 익단외류 측정

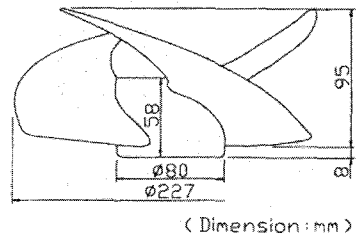
LDV를 이용한 로터 내부의 익단누설외류측정에 있어서는 레이저 빔과 회전익과의 간섭, 케이싱과 같이 레이저가 통과 할 수 있는 통과창 및 산란을 유도하기 위한 입자 (particle) 선정 등 많은 제한적인 요소를 갖고 있다.

먼저, 축류팬의 하류측에서 LDV를 이용한 연구사례⁽²⁾를 살펴본다. 본 연구에 사용한 축류팬은 날개수가 3개, 외경이 227 mm, 회전수가 1500 rpm인 저속 송풍기이다. 5 Watt Ar-ion 레이저 소스를 이용한 3

차원 LDV의 반경, 회전 및 축방향의 측정볼륨 크기는 각각 340, 89, 92 mm이다. Fig. 8에 축류팬의 측면도와 측정위치를 나타낸다. 날개의 후연 (trailing edge)에서 축방향으로 20 mm 하류측 면에서 최대효율점에서의 이차흐름의 속도벡터를 Fig. 9에 나타내었으며, 익단누설외류에 의한 이차흐름 (Fig. 9 “A1”)이 잘 나타나 있다.

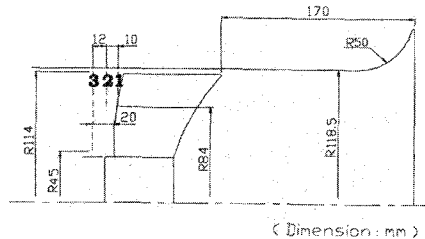
축류압축기의 로터의 후류 및 날개 끝단에서 LDV에 의한 측정도 많이 이루어지고 있다^{(3),(7)}. 특히, LDV측정과 함께 유동장의 외류특성을 파악할 수 있는 압력손실 등을 측정하기 위하여 Pitot probe나 Kiel probe를 병행하여 유동장을 측정하기도 하였다^{(3),(4)}.

Fig. 10은 슈라우드가 날개의 후방측 일부만 덮고 있는 것을 특징으로 하는 프로펠러 팬의 날개 선단을 LDV를 이용하여 측정한 예⁽⁸⁾를 나타낸다. Fig. 10은



(Dimension : mm)

(a)



(Dimension : mm)

(b)

Fig. 8 Axial flow fan : (a) side view of test fan and (b) meridional view of fan and measuring position

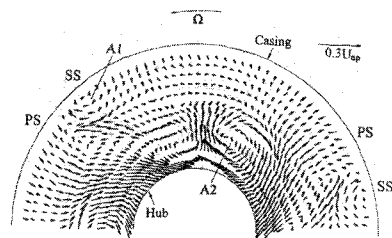


Fig. 9 Velocity vectors downstream of TE

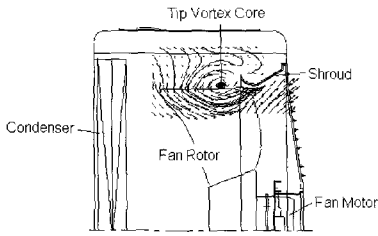
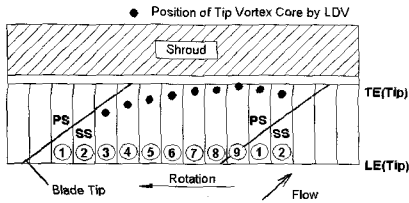
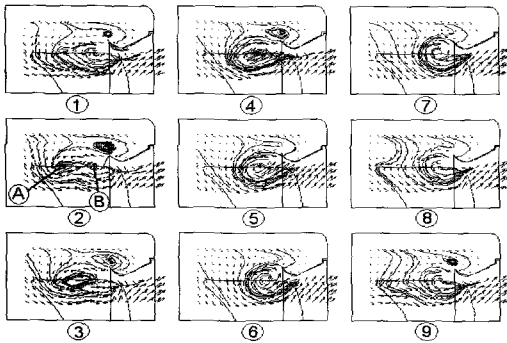


Fig. 10 Tangentially averaged velocity vectors and streamlines on meridional plane



(a)



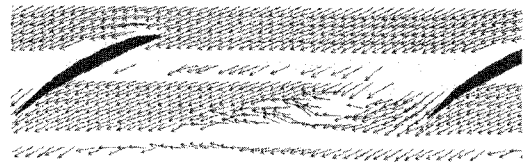
(b)

Fig. 11 Tangential distribution of meridional velocity vectors and streamlines : (a) position and trajectory of tip vortex core and (b) meridional velocity vectors and streamlines

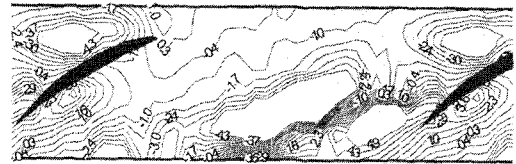
회전방향으로 평균된 자오면 유선과 자오면 속도벡터를 나타낸 것으로, 슈라우드의 전방에 와류중심과 함께 익단와류를 관찰할 수 있다. Fig. 11은 날개의 한 피치에서, 회전에 따른 와류구조를 실험적으로 파악하기 위하여 팬모터에 encoder를 장착한 후 날개의 회전과 동기된 자오면 속도분포와 유선을 나타낸 것이다. 즉, 날개의 한 피치는 Fig. 11(a)에서와 같이 9등분하였다. 날개의 전연 (leading edge) 근방의 부압면 측에서 발생한 익단와류 (Fig. 11(b)의 “A”)는 팬의 회전과 함께 압력면으로 이동함을 알 수 있으며, 이때 와류의 크기가 하류로 이동하면서 커짐을 알 수 있다.

그러나, 압력면 근방에서는 그 크기가 점점 작아지며 와류의 세기가 약해짐을 알 수 있다. 익단와류 중심점의 위치는 Fig. 11(a)에서와 같이 회전방향으로 발달하여, 전체적으로 와류 링 (vortex ring)을 형성함을 알 수 있다.

Fig. 12는 PDA(Particle Dynamic Analyzer)를 이용하여 축류팬의 익단누설와류를 측정⁽⁹⁾한 것으로, 그림에서는 98% 스팬면에서의 상대속도벡터 및 반경방향속도의 contour를 나타내고 있다. Fig. 12(a)의 상대속도벡터의 분포로부터 날개의 부압면의 후연근방에 역류(마이너스 축방향속도 성분)가 존재함을 알 수 있으며, 반시계 방향으로 상대속도성분이 나타나므로 이 영역에 익단누설와류가 존재함을 알 수 있다. 익단누설와류의 위치 및 특성은 Fig. 12(b)의 반경방향속도의 분포로도 확인할 수 있다.



(a)



(b)

Fig. 12 Relative velocity vector and radial velocity contour at the 98% blade span surface : (a) relative velocity vector and (b) radial velocity contour

2.3 PIV에 의한 익단와류 측정

LDV에 의한 점측정 방법을 면측정 방법으로 함으로써 측정시간을 단축함과 동시에 동 시간에 특정면을 측정할 수 있다는 장점으로 최근에는 PIV에 의한 유체기계 내부유동장 측정에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다^{(10),(12)}.

두 종류의 유체기계 (축류압축기 및 원심압축기) 내부 유동장 측정을 위하여 DPIV (Digital Particle Image Velocimetry) 이용⁽¹⁰⁾하고 있으며, 소형 축류팬 (외경: 174 mm) 로터 주위의 유동장⁽¹¹⁾도 PIV를 이

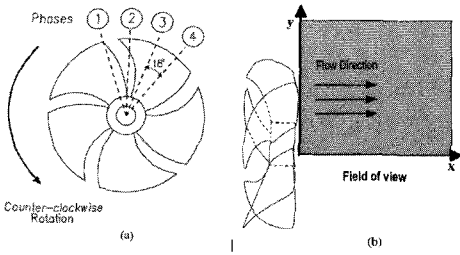


Fig. 13 Schematic diagram of axial-fan and measurement planes: (a) axial fan and four phases and (b) field of view

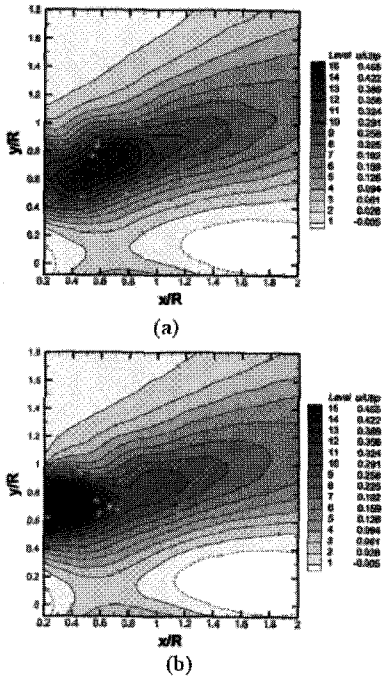


Fig. 14 Contour plots of the mean axial velocity component: (a) phase 2 and (b) phase 4 in Fig. 13

용하고 있다. Figs. 13과 14⁽¹²⁾는 축류팬 후류측에서 측정 위상면, 측정위치 및 두 곳의 위상면에서 평균 축방향 속도 contour를 각각 나타내고 있다. PIV를 이용하여 날개의 후류측에서 축방향속도 및 반경방향 속도 그리고 회전방향속도를 측정함으로써 익단에서 발생한 와류의 구조를 이해할 수 있다.

이상에서 살펴본 바와 같이 절대좌표계 관점에서 측정하는 속도값은 흐름장의 특성을 이해하는데 유효하나, 익단와류의 본질적인 특성인 비정상 특성이나 속도섭동을 이용하여 섭동의 주파수특성을 파악하기에는 한계가 있다.

3. 상대흐름 측정에 의한 익단와류 측정

3.1 회전 5공 프로브를 이용한 익단누설와류 측정

익단누설와류의 특성을 이해하기 위하여, 회전 5공 프로브를 로터의 하류측에 장착하고 후류의 상대속도를 측정하였다^{(13),(14)}. 로터가 회전중에도 허브에 장착된 프로브 이송장치를 이용하여 프로브를 이동시켜 가면서 로터에 대한 상대흐름을 측정함으로써, 로터의 후류 (wake) 및 후연 하류측의 삼차원속도를 측정한다. 이러한 상대흐름 측정은 로터에 의한 회전방향 섭동을 포함하여 흐름장을 측정할 수 있다⁽¹³⁾.

Fig. 15는 축류압축기 로터의 하류측에서 로터와 회전하며 상대흐름을 측정할 수 있는 회전 5공 프로브 (프로브 직경: 1.65mm)을 이용하여 측정한 축방향 속도 contour를 나타낸 것이다. 그림은 로터 후연에서 4% chord ($X=1.04$) 및 6% chord ($X=1.64$)의 하류 위치에서 측정한 것으로, 하류측으로 갈수록 환상 벽 경계층 (annulus wall boundary layer)이 증가하고, 후류는 사라짐을 알 수 있다.

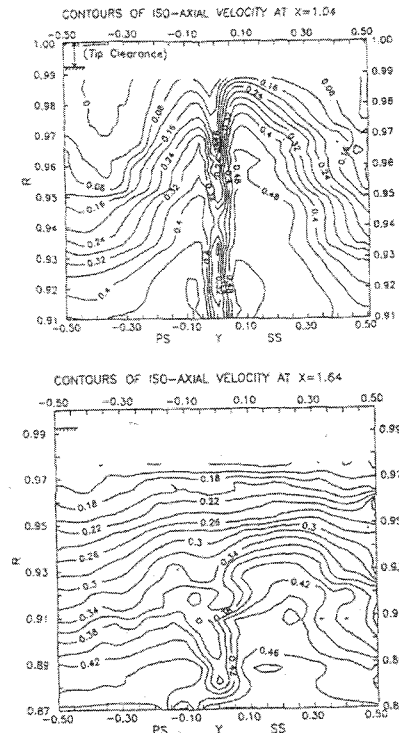


Fig. 15 Contours of iso-axial velocity at $x=1.04$ and $x=1.64$

3.2 회전열선센서에 의한 익단누설와류 측정

비정상 특성을 갖는 익단 누설 와류의 시간 변동을 측정하기 위해서는 회전하는 로터 익간의 유동장을 실시간으로 측정 가능한 상대 좌표계 (즉, 로터와 함께 회전하는)에 의한 측정 방법이 반드시 필요하다. 본 절에서는 응답속도가 빠른 열선센서를 이용하여 축류팬 로터에 대한 상대흐름의 비정상 측정사례를 소개한다^{(15),(16)}.

날개 끝단 근방에서 익단누설와류의 상대속도는 Fig. 16에서 나타낸 것과 같이, 웬 로터와 함께 회전하는 두 개의 I형 열선 프로브를 사용하였다. 열선 센서는 직경이 5 mm인 텅스텐 선으로 정온도 (constant temperature)형 열선풍속계를 사용했다. Fig. 16에서 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. 17에 나타낸 것과 같이, 회전시스템의 측정값을 수은 슬립링을 통하여 측정용 컴퓨터에 전송되어, 자동 샘플링을 통하여 제반 통계량

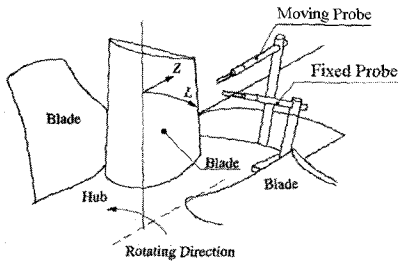


Fig. 16 Test blade measuring system

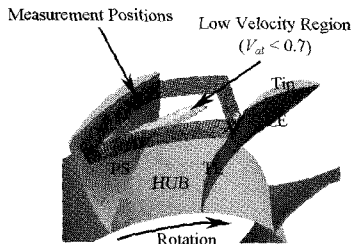


Fig. 18 Experimental grid in the blade passage

이 산출된다.

Fig. 18는 열선 센서를 이용한 익간 내부유동 측정 격자점을 나타낸다. 본 그림은 날개 후방의 상단에서 반경 방향의 측정은 76% 스패น (255 mm)에서 98% 스패น (285 mm)까지의 영역을 설정하였으며, 측정간격은 약 3 mm로 하였다. Fig. 19에는 설계 유량점에서 열선 센서에 의해 측정된 저속 영역을 함께 표시하고 있다. 이 저속영역은 익단누설와류의 위치 및 크기를 나타낸다. 축류팬의 설계점에서 익단누설와류 주위의 속도 및 그 섭동치의 특성을 이해하기 위해서는, 익단누설와류와 직각을 이루는 측정단면을 설정하여 각각의 단면에서 회전열선센서를 이용하여 상세한 물리량 측정이 필요하다. Fig. 19는 익단누설와류에 준직교하는 법선을 표시한 것이다.

Figs. 20과 21은 Fig. 19에서 정한 준직교 측정면에서 회전열선 센서를 이용하여 측정된 상대속도 및 그 섭동치 분포를 나타낸 것이다. 본 측정방법으로 익단누설와류의 위치와 크기를 정확히 이해할 수 있으며, 누설와류의 섭동값이 주류와 누설와류의 간섭면에 큰 것을 본 실험을 통하여 파악할 수 있다.

Fig. 22는 Fig. 20(b)의 98%스패んに ×로 표시한 측정점에서 속도 섭동치의 스펙트럼 분포를 나타낸다.

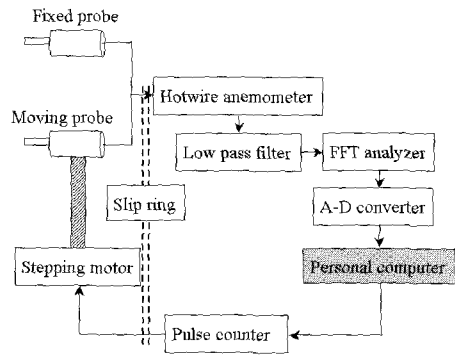


Fig. 17 Diagram of on-line measuring system

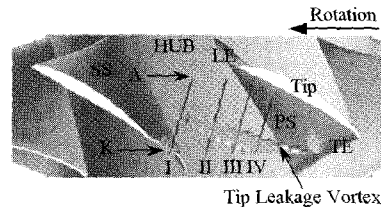


Fig. 19 Quasi-orthogonal measuring planes to the tip leakage vortex

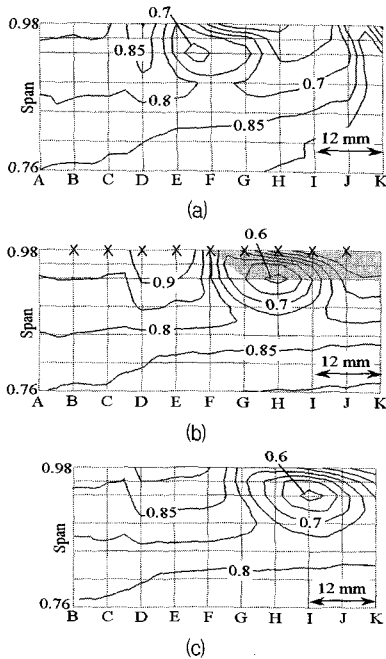


Fig. 20 Contour of relative velocity on the quasi-orthogonal planes to the tip leakage vortex (interval of contour lines = 0.05) : (a) plane i, (b) plane ii and (c) plane iii

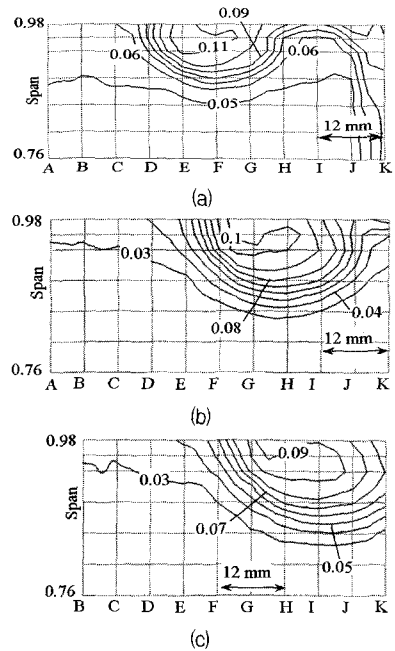


Fig. 21 Contour of velocity fluctuation on the quasi-orthogonal planes to the tip leakage vortex (interval of contour lines = 0.05) : (a) plane i, (b) plane ii and (c) plane iii

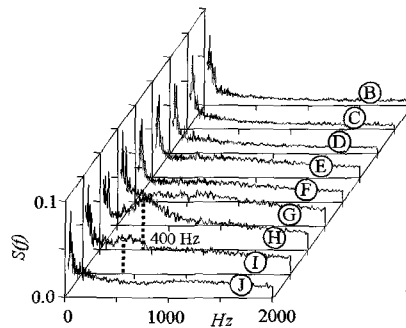


Fig. 22 Spectrum of velocity fluctuation at 0.98 percent span of Plane II in Fig. 20

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 있으며, 이는 로터와 회전하며 상대흐름을 측정함으로 구할 수 있다.

4. 결 언

이상에서, 축류형 유체기계의 날개 끝단의 외류흐름을 중심으로 내부유동의 절대 및 상대흐름 측정에 의

한 연구사례를 살펴보았다. 익단누설외류가 비정상 (unsteady) 특성을 갖으며, 소음발생에도 중요한 원인이 되므로, 상대흐름측정한 비정상 거동계측은 유동뿐만 아니라 소음평가에도 중요한 역할을 함을 알 수 있다.

참고문헌

- (1) Inoue, M., Kurooumaru, M., and Fukuhara, M., 1986, "Behavior of Tip Leakage Flow Behind an Axial Flow Compressor Rotor,"

- Trans. ASME, Journal of Gas Turbine and Power, Vol. 108, pp. 7~13.
- (2) Myung, H. J. and Baek, J. H., 1999, "Mean Velocity Characteristics Behind a Forward-Swept Axial-Flow Fan," JSME International Journal, Vol. 42, pp. 476~488.
 - (3) Lakshminarayana, B. and Murthy, K.N.S., 1988, "Laser-Doppler Velocimeter Measurement of Annulus Wall Boundary Layer Development in a Compressor Rotor," ASME Journal of Turbomachinery, Vol. 110, pp. 377~385.
 - (4) Foley, A. C. and Ivey P. C., 1996, "Measurement of Tip-Clearance Flow in a Multistage, Axial Flow Compressor," ASME Journal of Turbomachinery, Vol. 118, pp. 211~21.
 - (5) Murthy, K. N. S. and Lakshminarayana B., 1986, "Laser Doppler Velocimeter Measurement in the Tip Region of a Compressor Rotor," AIAA Journal, Vol. 24, No. 5, pp. 807~814.
 - (6) Stauter, R. C., 1993, "Measurement of the Three-Dimensional Tip Region Flow Field in an Axial Compressor," ASME Journal of Turbomachinery, Vol. 115, pp. 468~476.
 - (7) Cho, S. O., Kang, D. J., and Cho, K. R., 1990 "An Experimental Study on the Vorticity Distribution in Flows Behind an Axial Flow Rotor," Proc. 2nd KSME-JSME Fluids Engineering Conference, Seoul, Korea, Vol. 2.
 - (8) 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," ASME Journal of Fluids Engineering, Vol. 123, No. 4, pp. 750~761.
 - (9) Du, Z., Lin, W., Zhu, X., and Zhao, Y., 2002, "The Measurement of Three-Dimensional Flow Field in an Axial Flow Fan Using PDA," Proceedings of ASME FEDSM2002-31098.
 - (10) Wernet, M. P., 2000, "Application of DPIV to Study Both Steady State and Transient Turbomachinery Flows," Optics & Laser Technology, Vol. 32, pp. 497~525.
 - (11) Im, Y.-C., Kobayashi, T., Saga, T., and Oshima, M., 2002, "An Experimental Measurements of the Three-Dimensional Flow in and around Axial Flow Fan," Turbomachinery Society of Japan, Vol. 30, No. 8, pp. 491~496.
 - (12) Yoon, J.-H. and Lee. S.-J., 2003, "Stereoscope PIV Measurements of Flow Behind an Isolated Low-Speed Axial-Fan," Experimental Thermal and Fluid Science, accepted for publication.
 - (13) McLean, C., Camci, C., and Glezer, B., 2001, "Mainstream Aerodynamic Effects Due to Wheel-space Coolant Injection in a High-Pressure Turbine Stage: Part II- Aerodynamic Measurements in the Rotational Frame," ASME Journal of Turbomachinery, Vol. 123, pp. 697~703.
 - (14) Lakshminarayana, B., Zaccaria, M., and Marathe, B., 1995, "The Structure of Tip Clearance Flow in Axial Flow Compressors," ASME Journal of Turbomachinery, Vol. 117, pp. 336~347.
 - (15) Fukano, T. and Jang, C.-M., 2004, "Tip Clearance Noise of Axial flow Fans Operating at Design and Off-Design Condition," Journal of Sound and Vibration, Vol. 275, pp. 1027~1050.
 - (16) Jang, C.-M., Kim, K.-Y., and Fukano, T., 2004, "Frequency Characteristics of Fluctuating Velocity according to Flow rates in a Tip Leakage Vortex and a Wake Flow in an Axial Flow Fan," Transactions of KSME, Vol. 28, No. 2, pp. 181~188.