

에어콘 실외기용 축류송풍기의 비정상 유동장 특성 연구

장춘만*

Unsteady Flow Characteristics of an Axial Flow Fan Installed in the Outdoor Unit of Air Conditioner

Choon-Man Jang*

Key Words : Axial Flow Fan(축류송풍기), Frequency(주파수), Wavelet Transform(웨이브렛 변형), Tip Vortex(익단와류), Pressure Fluctuation(압력변동), Noise(소음)

ABSTRACT

The unsteady nature of vortex structures has been investigated by a large eddy simulation (LES) in an axial flow fan with a shroud covering only the rear region of its rotor tip. The simulation shows that the tip vortex plays a major role in the structure and unsteady behavior of the vortical flow in the fan. The movements of the vortex structures induce high-pressure fluctuations on the rotor blade and in the blade passage. Frequency characteristics of the fluctuating pressure on the rotor blade are analyzed using wavelet transform. The dominant frequency of the real-time pressure selected at the high pressure fluctuation region corresponds well to that of the fluctuating rotor torque and the experimental result of fan noise. It is mainly generated due to the unsteady behavior of the vortical flow, such as the tip vortex and the leading edge separation vortex.

1. 서론

슈라우드가 송풍기 날개의 일부만을 덮는 구조로 되어 있는 저압, 저속용 축류송풍기는 가정용 에어컨 실외기 또는 자동차 엔진의 냉각용으로 널리 사용되어 지고 있다. 이러한 송풍기 날개의 설계 시에는, 송풍기 익면에서 압력변동에 의해 방출되는 소음이 지금까지 송풍기 날개 설계자들의 주요한 관심사항이 되어 왔다. 본 연구에서는 저속형 축류송풍기인 에어컨 실외기용 송풍기를 대상으로, 비정상 익단 유동장을 해석하고 익면상의 압력분포를 분석하여 소음원의 주파수 특성을 고찰하고자 한다.

저압용 축류송풍기에 관한 성능 및 소음 특성연구는 지금까지 다수 발표되었다. 예를 들어, Fukano 등^{(1),(2)}은 축류송풍기 날개 틈새간격, 날개와 슈라우드간의 설치 거리 등을 변수로 하여 소음 및 성능특성을 선도적으로 수행하였다. Sato와 Kinoshita⁽³⁾는 LDV를 이용하여 축류송풍기 날개 주위의 와류구조를 측정하였으며, Akaike 등⁽⁴⁾은 자동차 엔진 냉각팬의 소음저감을 위하여 송풍기 날개와 슈라우드의 특성에 따른 영향을 분석하였다. Longhouse⁽⁵⁾는 축류송풍기의 익단 누설와류에 의한 소음을 줄이기 위하여 회전슈라우드를 날개 외측에 장착하였다.

일반적으로, 공기역학적인 송풍기 소음은 광범위한 주파수영역에 분포되는 broadband noise 및 discrete noise로 대별할 수 있다. 저속 송풍기에서는 익면상의 압력변동에 의한 dipole source⁽⁶⁾가 주요한 소음원으로

* 한국건설기술연구원 화재 및 설비연구부
E-mail : jangcm@kict.re.kr

Table 1 Design specifications of fan

Flow Coefficient	0.27
Pressure Coefficient	0.22
Rotor Rotation Frequency	670 rpm
Tip Diameter	380 mm
Hub-Tip Ratio at Rotor Inlet	0.318
Number of Blade	5
Solidity at Tip	0.75
Hub Inclination	20 deg.
Tip Inclination	0

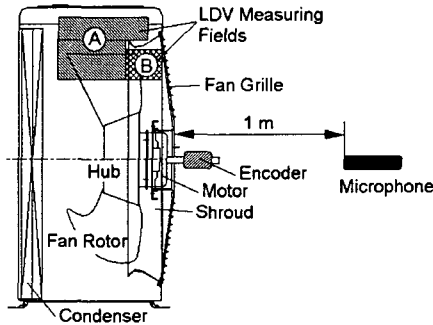


Fig. 1 Side sectional view of experimental apparatus

알려져 있다. 따라서, 에어컨 실외기용 송풍기와 같이 지속적으로 운전되는 축류송풍기에서는 날개 익면의 압력변동이 소음에 중요하다고 할 수 있다. Sugio 등⁽⁷⁾은 에어컨 실외기용 축류송풍기에 있어서, 익면상의 압력변동값이 전체 송풍기 소음에 중요한 요인이 됨을 밝혔다. Kintou 등⁽⁸⁾은 LDV를 사용하여 축류송풍기 날개 주위의 속도분포와 난류강도를 측정하였으며, 익면상의 압력변동을 이해하는 것이 송풍기 소음의 원인을 규명하는데 유용함을 밝혔다. 그러나 실험적인 방법을 통하여 저속형 축류송풍기 익면의 압력변동을 측정하여 소음을 평가하는 데는 많은 제약요소를 가지고 있다.

최근 들어, 컴퓨터의 향상과 더불어 계산음향학(computational aeroacoustics)을 이용한 소음예측기법이 도입되고 있다. Kato 등⁽⁹⁾은 원형기동 및 익형에서 발생하는 난류 후류(turbulent wake)의 거동을 이용한

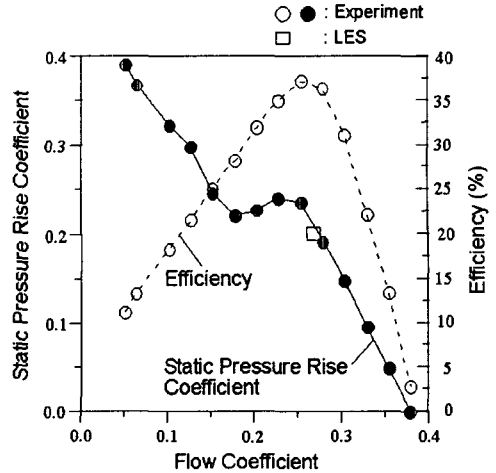


Fig. 2 Total performance

수치해석적인 소음예측을 수행하였다. 그러나 삼차원 축류송풍기에서 난류소음을 예측하기에는 현실적으로 막대한 계산시간이 필요하기에 산업체에서 적용하기에는 아직도 기술적인 문제가 많다.

본 연구에서는 축류송풍기의 익면에서 압력변동에 의한 주파수 특성을 분석하고자 LES(Large Eddy Simulation)을 도입하여 익단의 와류특성을 해석하고, 익면상의 압력변동 값을 웨이브렛 변형(wavelet transform)으로 주파수 특성을 분석하였다. 또한, 실험에서 측정된 소음의 주파수 특성과 본 수치계산을 통하여 얻은 주파수 값을 비교, 분석하였다.

2. 축류 송풍기

본 연구에서는 슈라우드의 일부만이 송풍기 날개를 덮고 있는 것을 특징으로 하는 저속형 축류송풍기를 대상으로 하였다. 설계유량 조건에서의 송풍기사양은 Table 1에 나타내었다. Fig. 1에 나타낸 것과 같이, 가정용 분리형 에어컨의 실외기에 장착한 후에 LDV(Laser Doppler Velocimetry)를 이용하여 익간 내부 유동장을 측정하였으며, 송풍기 성능측정장치를 이용하여 성능을 평가 하였다.^{(10),(11)} 에어컨 실외기는 Fig. 1과같이, 열교환기, 송풍기 및 구동모터 등으로 구성되어 있으며, 본 연구에서는 송풍기만을 구동시켜 소음을 측정하였다. 축류송풍기의 성능 곡선은 Fig. 2에 나타내었다.

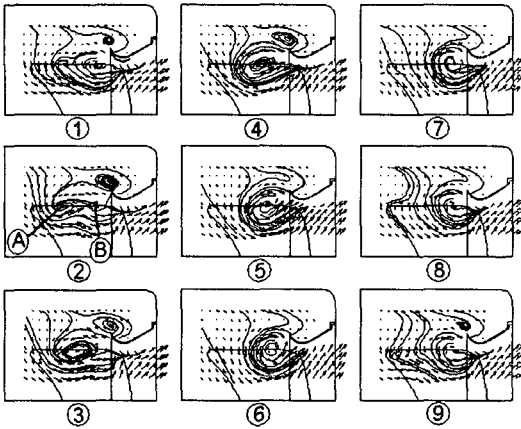


Fig. 3 Tangential distribution of meridional velocity vectors and streamlines (LDV results)

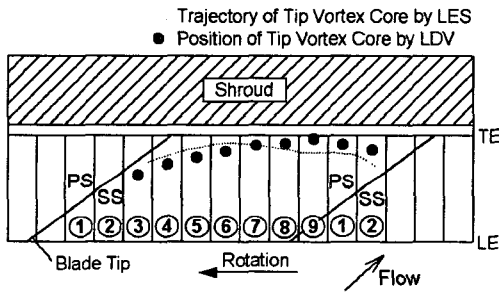


Fig. 4 Trajectory of tip vortex core

3. LDV를 이용한 익단 유동장 계측

송풍기 익단 내부유동장 계측은 LDV를 이용하여 계측하였으며, Fig. 1에 측정위치를 나타내었다. 본 연구에서는 익단와류의 거동에 의한 익면상의 압력변동에 주목하여, 예비실험을 통하여 75% 스패 이상만을 계측하였다. 자세한 계측기 사양 및 측정방법은 기 발표한 논문⁽¹⁰⁾에 나타내었다.

Fig. 3은 날개의 한 피치를 9등분하고, 간 구간에서의 회전방향으로 시간평면을 취한 흐름장에서 유선 및 속도벡터 분포를 나타낸 것이다. 날개의 부압면의 중간 코드에서 발생한 익단와류가 ("A") 날개의 압력면 방향으로 발달함을 알 수 있다. 즉 날개의 중간 피치근방에서 최대의 와류구조를 갖으며, 하류측으로 이동하다가 사라짐("B")을 알 수 있다.

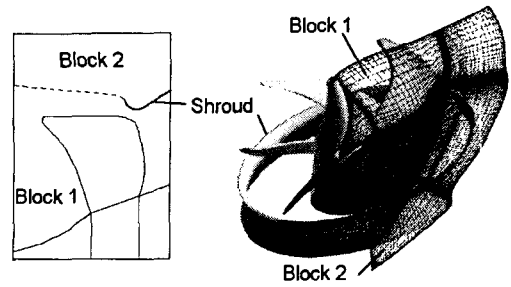


Fig. 5 Computational grid with 50% grid density

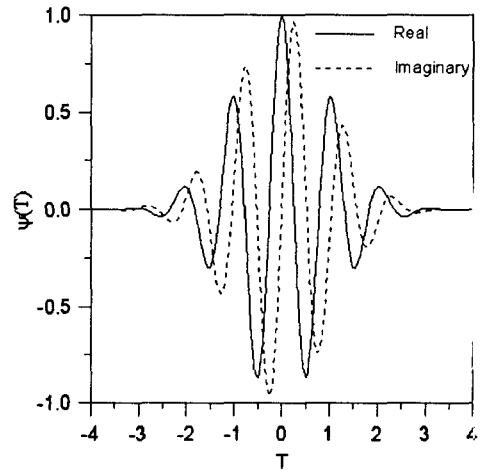


Fig. 6 Morlet wavelet

Fig. 4는 Fig. 3에서의 와류중심을 나타낸 것으로 날개의 슈라우드에서 허브쪽으로 바라본 그림이다. 부압면에서 발생한 익단와류가 회전방향으로 이동함을 알 수 있다.

4. LES에 의한 유동장 해석

수치해석은 나비에-스톡스(Navier-Stokes)방정식을 기초적으로, 시간적으로는 완전 음해법 (Implicit Method)을, 공간적으로는 육면체 셀을 이용한 셀 중심형 유한체적법을 이용해 이산화 하여 수행하였다. 비점성 유속의 Explicit항은 TVD(Total Variation Diminishing)법에 기초한 High Resolution Upwind Scheme을 적용시켰다. Van Driest의 Damping 함수를 포함시킨 표준 Smagorinsky 모델을 Subgrid-Scale 응

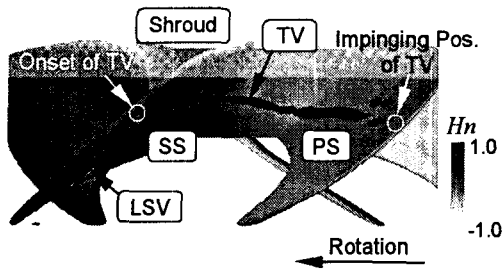


Fig. 7 Vortex cores colored with normalized helicity in time-averaged flow field

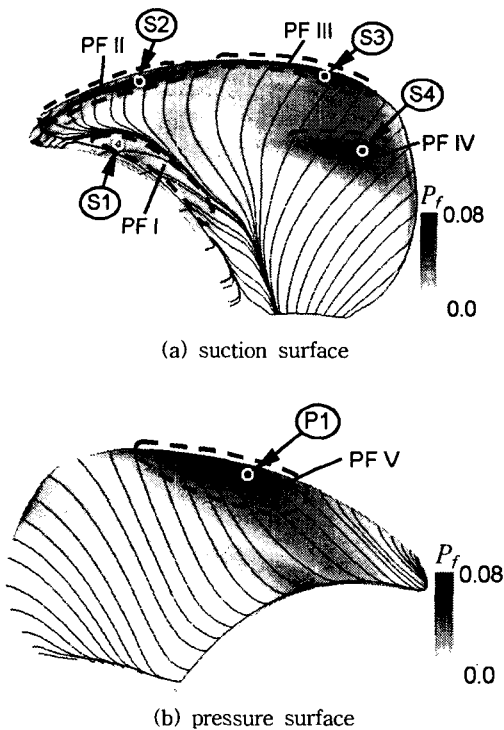


Fig. 8 Pressure fluctuation on suction surfaces with limiting streamlines in time-averaged flow field

력장 계산을 위해 적용시켰다. 계산격자는 Fig. 5에서와 같이 슈라우드를 포함하는 복잡한 날개 구조에 대해 효과적으로 계산하기 위하여 Two-Block, H형 구조격자로서 형성시켰다. 계산 격자점은 약 130만개로, 해석 프로그램을 병렬화하여 슈퍼 컴퓨터에서 계산하

였다. 계산 경계조건 등 자세한 계산방법은 기 발표한 논문에서 기술하였다.⁽¹²⁾

5. 웨이브렛 변환

본 수치계산에서 얻은 압력변동의 시간분포를 이용하여 주파수 특성을 계산하기 위해 실시간으로 주파수 특성을 파악할 수 있는 웨이브렛 변환(wavelet transform)을 수행하였다. 실수부와 복소함수를 갖는 연속형 웨이브렛을 사용하였으며, mother wavelet으로 Fig. 6에 나타난 Morlet wavelet을 사용하였다. 본 계산에서 사용한 웨이브렛 변환에 대한 자세한 설명은 기 발표한 논문에서 기술하였다.⁽¹³⁾

5. 결과 및 고찰

5.1 익단근방 와류의 비정상 거동에 의한 익면상의 압력 변동 및 로터 토크 특성

익단 근방의 와류구조의 비정상 특성을 파악하기 위하여, 설계유량 조건에서 LES를 수행하였다. 날개 뒷반경과 입구축 음속으로 무차원한 무차원 시간은 0.05로 하였다. 날개의 1피치 계산에 필요한 무차원 시간이 32.3 이기에, 본 계산에서는 646시간 스텝이 1피치 계산에 소요된다. 이는 주파수로는 36 KHz에 상당하기에 본 축류송풍기의 주파수를 해석하기에는 충분한 시간 간격이라고 사료된다.

Fig. 7은 시간평균 흐름장에 대하여, 와류구조를 동정화(identification)하고 normalized helicity로 색칠한 것이다. Normalized helicity는 흐름방향 와류의 회전중심에서 1 또는 -1의 값을 갖으며, 부호는 흐름방향속도에 대한 회전방향(시계 또는 반시계)을 의미한다. 와류구조 동정화 및 normalized helicity의 정의식에 대한 상세한 설명은 기 발표논문^{(11),(14)}에 기술하였다. Fig. 7에서 알 수 있듯이, 날개 끝단 근방에서 2개의 와류구조가 존재함을 알 수 있다. 즉, 익단와류(TV, tip vortex)와 전연막리와류(LSV, leading edge separation vortex)가 존재한다. 익단와류의 위치는 Fig. 4에서 나타난 실험값과 비교했을 때 잘 일치함을 알 수 있고, 또한 성능결과도 Fig. 2와 비교한 바와 같이 잘 일치함을 알 수 있다.

비정상 수치해석⁽¹⁴⁾을 통하여, 익단와류는 시간에 따라 날개의 중간 피치에서 와류붕괴 (vortex breakdown)로 인하여 큰 변형을 갖음을 알 수 있었다.

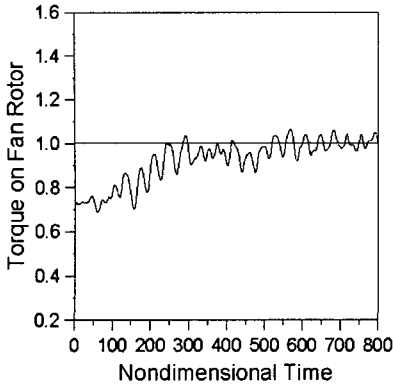


Fig. 9 Time history of rotor torque

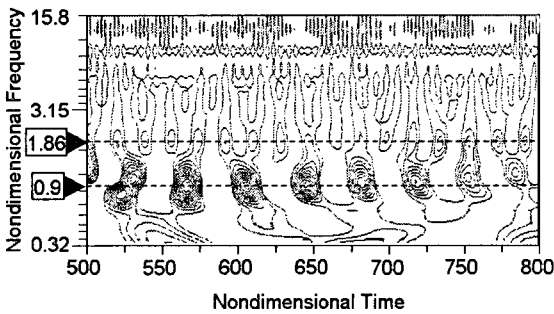


Fig. 10 Wavelet transform of fluctuating rotor torque (real part, only positive values are shown)

이러한 익단와류의 시간변동으로 인하여, 인접하는 날개 압력면에 규칙적인 충돌이 발생하며, 날개 압력면에 압력 변동값이 현저하게 나타나게 된다.

Fig. 8은 날개의 압력면과 부압면에서의 압력변동값과 한계유선(limiting streamline)을 나타낸 것이다. 본 압력 변동값은 날개 끝단에서의 동압으로 무차원하여 나타낸 것이다. Fig. 8(a)의 날개 부압면에서 나타냈듯이, 날개의 전연근방에서 박리선이, 그 뒤로 부착선이 존재하며, 그사이에 박리버블 영역이 존재함을 알 수 있다. 이 지역(PF I)은 박리버블영역이 매우 얇기에 상대적으로 낮은 압력변동 값을 갖는다. 그림에서 상대적으로 큰 압력변동값 영역 PF II는 전연박리와류가 날개 부압면과 간섭하여 나타난 것이며, PF III 영역은 익단와류의 발생위치가 시간에 따라 변동하며 부압면과 간섭하여 나타난 것이다.

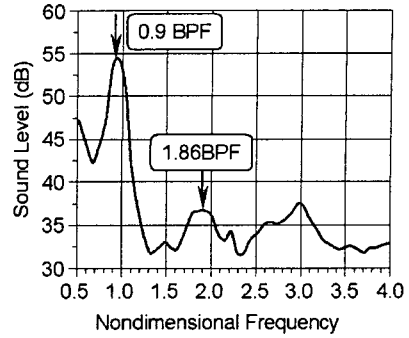


Fig. 11 Fan noise characteristics (experimental result)

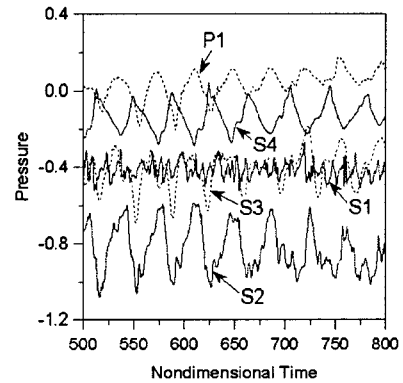


Fig. 12 Time history of pressure on rotor blade

또, 영역 PF IV는 익단와류와 주류(main flow)가 간섭하는 영역이다. Fig. 8(b)의 날개 압력면에서는 익단와류가 압력면과 충돌하는 영역 PF V에서 상대적으로 큰 압력변동이 나타남을 알 수 있다.

Fig. 9는 무차원 토크의 시간이력을 나타낸 것이다. 그림에서 500 무차원시간 까지를 천이영역으로 보고, 500-800 무차원시간의 데이터만을 해석에 이용하였다. 이 500-800사이의 300 무차원 시간은 9.3 피치의 회전에 상당하는 값이다. 500-800 까지의 무차원 시간에서의 토크값을 웨이브렛 변형을 하여 얻은 주파수 특성을 Fig. 10에 나타내었다. Fig. 10에서 횡축은 무차원 시간을, 종축은 날개의 BPF(blade passing frequency)로 무차원한 무차원 주파수를 나타낸다. 이 그림은 웨이브렛의 실수부만 나타내고 있으며, 0.9 및 1.86 BPF에서 규칙적인 주파수를 나타낸다.

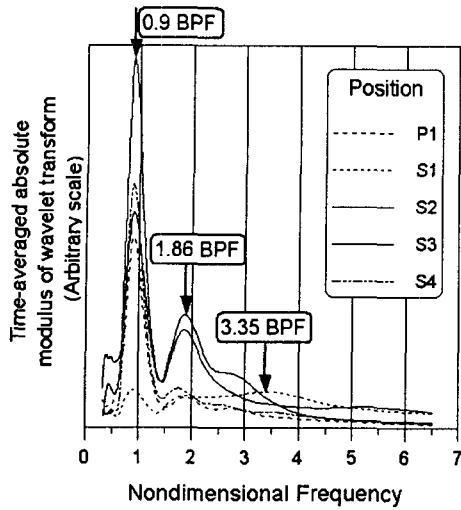


Fig. 13 Spectrum of fluctuating pressure on rotor blade at the selected positions

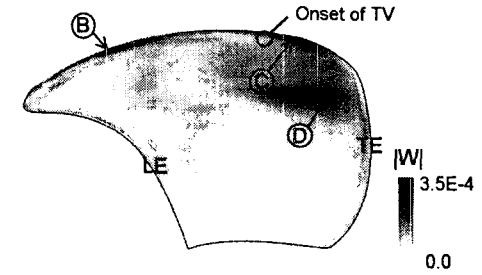
0.9 및 1.86 BPF는 Fig. 11에 나타낸 소음실험값의 피크 주파수와 잘 일치함을 알 수 있다. 이것은 날개의 부하변동에서 기인한 것으로 익면상의 압력변동과 밀접한 관계를 가지고 있다.

5.2 익면상에서 주요 주파수별 웨이브릿 계수의 절대값 분포 특성

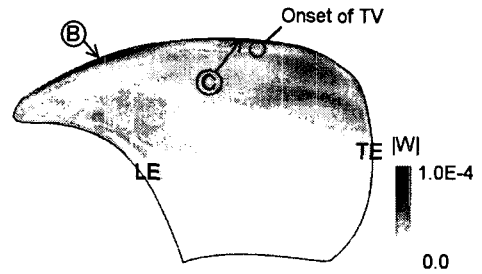
익면상에서 발생하는 압력변동의 주파수특성을 고찰하기 위하여, Fig. 8에서 압력변동 값이 상대적으로 큰 영역에서 각각 5곳(P1, S1, S2, S3 및 S4)의 압력변동을 발췌하였다. Fig. 12에 각각의 위치에서 압력변동의 시간변동분포를 나타낸다.

Fig. 13은 Fig. 12의 압력변동을 이용, 웨이브릿 해석을 통해 얻은 웨이브릿의 절대모듈의 시간평균값을 나타낸 것이다. 이 값은 Fig. 10에서 나타낸 일반적인 웨이브릿 분포를 변형한 것으로, 한정적인 시간범위 내에서 취한 데이터를 이용하여 피크 주파수의 분포를 파악하는 데에 편리하다. 0.9 BPF에서의 스택트럴 피크는 박리버블영역인 S1을 제외하고 모든 지점에서 존재한다. 또, 1.86 BPF는 전연박리와류 영역인 S2 및 S3에서 상대적으로 큰 값을 갖는다.

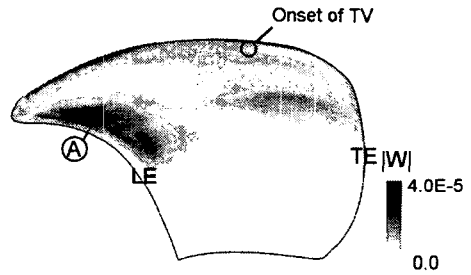
한편, 3.35 BPF의 스펙트럴 피크는 0.9 BPF와는 크기가 상대적으로 적지만, 박리버블영역인 위치 S1에 존재한다.



(a) 0.9 BPF



(b) 1.86 BPF



(c) 3.35 BPF

Fig. 14 Distribution of amplitude of the absolute modulus of wavelet coefficient for fluctuating pressure on suction surface

즉, 박리버블 영역에서의 주파수는 익단누설와류의 변동주파수 0.9 BPF와 다름을 알 수 있으며, 전체소음 측면에서도 그 기여도가 낮다. 0.9 BPF의 스펙트럴 피크는 로터의 토오크에서 얻은 주파수값과 일치하며, 이는 익단와류에 의한 변동에 의하여 발생함을 알 수 있다.

Fig. 14 및 Fig. 15는 Fig. 13에서 도출한 3개의 스펙트럴 피크를 대상으로 익면상에서의 각각의 피크주

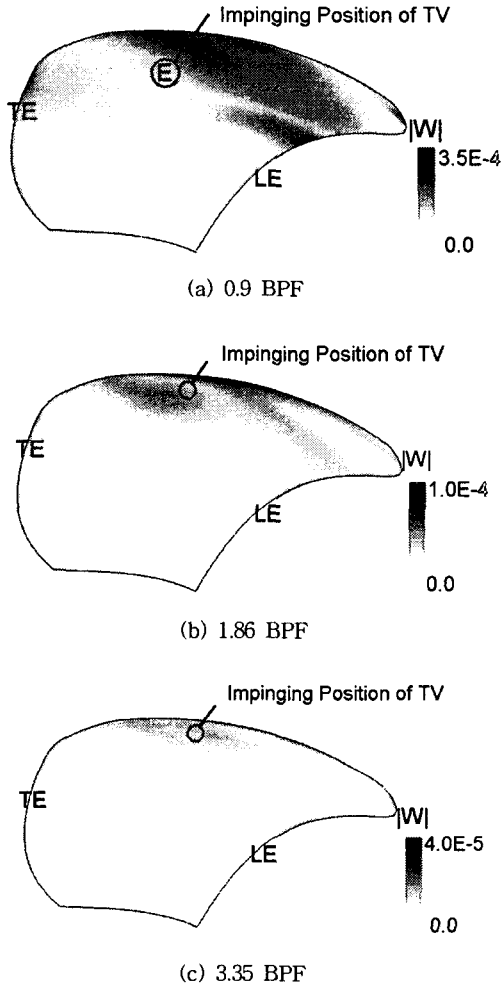


Fig. 15 Distribution of amplitude of the absolute modulus of wavelet coefficient for fluctuating pressure on pressure surface

파수에 대한 웨이블릿 계수의 절대 모듈러스를 나타낸 것이다. 각각의 주파수에서 나타낸 절대 모듈러스의 legend 값 $|W|$ 는 그림의 선명도를 높이기 위하여 서로 다르게 나타냈다. Fig. 14 및 Fig. 15에서의 절대 모듈러스 값은 익면에서 축방향으로 60 곳, 스펠방향으로 61곳을 선정, 총 3,660개소에서의 압력 변동값을 각각 웨이블릿 해석을 하여서 구한 값이다.

Fig. 14(a)에서와 같이, 0.9 BPF에서는 전연박리와류 영역(B in Fig. 14), 익단와류 영역(C in Fig. 14)

및 주류와 익단와류가 간섭하는 영역(D in Fig. 14) 근방에서 상대적으로 큰 절대 모듈러스 값을 갖음을 알 수 있다. 즉, Fig. 8에서 나타낸 것과 같이 높은 압력변동을 나타내는 영역에서 분포하는 0.9 BPF는 익단와류의 변동에서 기인한 것이며, 이 주파수와 연동하여 전연박리와류도 동일한 주파수에서 큰 값을 갖음을 알 수 있다.

1.86 BPF에서는 전연박리와류 영역(B in Fig. 14), 익단와류 영역(C in Fig. 14)에서 상대적으로 큰 값을 갖고, 3.35 BPF의 경우는 날개 전연근방의 박리버블 영역(A in Fig. 14)에서만 상대적으로 큰 값을 갖는다. 즉, 1.86 BPF는 전연박리와류 영역근방에, 3.35 BPF는 박리버블영역에 강하게 나타난다. 그러나 3.35 BPF의 경우에는 상대적으로 절대 모듈러스 값이 0.9 BPF의 값보다 작기에 전체 소음에 미치는 효과는 작다고 할 수 있다.

한편, 날개의 압력면에서는 익단와류가 압력면과 간섭하는 영역(E in Fig. 15)에서 0.9 BPF의 주파수가 강하게 나타남을 알 수 있다. 이는 익단와류의 변동주파수에 해당하며, 이 주파수가 전체 토오크의 변동값에도 상응한다.

이상에서 고찰한 것과 같이 익면상의 압력변동은 저속 축류송풍기에서 주요한 소음원임을 알 수 있으며, 익면상의 압력변동 값을 이용하여 웨이블릿 변환을 통해 각각의 주파수 날개의 어느 부분에 크게 기여하는지를 알 수 있었다.

6. 결론

본 연구에서는 에어컨 실외기에 장착되어 있는 저속형 축류송풍기의 익간유동을 LES로 해석하고, 익면상의 압력변동과 토오크 변동을 이용하여 웨이블릿 변환을 수행하여 익면상에서 발생하는 주파수의 특성을 분석하였다.

참고문헌

- (1) Fukano, T., Fukuhara, M., Kawagoe, K., Hara, Y. and Kinoshita, K., 1990, "Experimental Study on the Noise Reduction of a Propeller Fan, 1st Report, Aerodynamic Characteristics," Trans. of the JSME, Series B, Vol. 56, No. 531, pp. 3378-3382 (in Japanese).
- (2) Fukano, T., Kawagoe, K., Fukuhara, M., Hara, Y. and Kinoshita, K., 1990, "Experimental Study

- on the Noise Reduction of a Propeller Fan, 2nd Report, Noise Characteristics," *Trans. of the JSME, Series B, Vol. 56, No. 531*, pp. 3383-3388 (in Japanese).
- (3) Sato, S. and Kinoshita, K., 1993, "Improvement in Performance of Propeller Fans for Outdoor Units of Airconditioners," *Proceeding of the 4th Asian International Conference on Fluid Machinery, Vol. 1*, pp. 166-170.
- (4) Akaike, S. and Kikuyama K., 1993, "Noise Reduction of Pressure Type Fans for Automobile Air Conditioners," *ASME Journal of Vibration and Acoustics, Vol. 115*, pp. 216-220.
- (5) Longhouse, R. E., 1978, "Control of Tip-Vortex Noise of Axial Flow Fans by Rotating Shrouds," *Journal of Sound and Vibration, Vol. 58, No. 2*, pp. 201-214.
- (6) Curle, N., 1955, "The Influence of Solid Boundaries upon Aerodynamic Sound," *Proc. Roy. Soc., A231*, pp. 505-514.
- (7) Sugio, T., Sano, K., Atarashi, M., Tomohiro, T., Kida, T. and Ogata, H., 1989, "Low Noise Fans for Air Conditioners," *National Tech. R., (in Japanese), Vol. 35, No. 6*, pp. 676-682.
- (8) Kintou, B., Yamaguchi, N., Aoki, B. and Arata, Y., 1991, "Noise Reduction in a Propeller Fan for Air Conditioning," *Turbo. Soc. Jpn., (in Japanese), Vol. 19, No. 6*, pp. 333-340.
- (9) Kato, C., Iida, A. and Ikegawa, M., 1995, "Numerical Simulation of Aerodynamic Sound Radiated from Low Mach Number Turbulent Wakes," *ASME FED-Vol. 219*, pp. 53-58.
- (10) Jang, C.-M., Furukawa, M. and Inoue, M., 2001, "Noise Reduction by Controlling Tip Vortex in a Propeller Fan," *JSME Int. J., Vol. 44, No. 4, B*, pp. 748-755.
- (11) Jang, C.-M., Furukawa, M. and Inoue, M., 2001, "Analysis of Vortical Flow Field in a Propeller Fan by LDV Measurements and LES- PART I: Three-Dimensional Vortical Flow Structures," *Trans. ASME, J. Fluids Eng., Vol. 123, No. 4*, pp. 748-754.
- (12) Jang, C.-M., Furukawa, M., Saiki, K. and Inoue, M., 1999, "Large Eddy Simulation of Vortical Flow in a Half-Ducted Propeller Fan," *Proc. 3rd ASME/JSME Joint Fluids Eng. Conf., FEDSM99-6850*.
- (13) Jang, C.-M., Furukawa, M. and Inoue, M., 2001, "Frequency Characteristics of Fluctuating Pressure on Rotor Blade in a Propeller Fan," *JSME Int. J., Vol. 46, No. 1, B*, pp. 163-172.
- (14) 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.