

엇회전식 축류팬의 3차원 비정상 유동에 관한 실험적 연구

박현수[†] · 조이상* · 강현구** · 조진수***

Experimental Study on the Three Dimensional Unsteady Flow in a Counter Rotating Axial Flow Fan

Hyunsoo Park, Leesang Cho, Hyunkoo Kang and Jinsoo Cho

Key Words : Three Dimensional Unsteady Flow Field(3차원 비정상 유동장), Counter Rotating Axial Flow Fan(엇회전식 축류팬), Slanted Hot-Wire(경사 열선)

Abstract

Experiments were done for the three dimensional unsteady flow in a counter rotating axial flow fan under stable operating condition. Flow fields in a counter rotating axial flow fan were measured at cross-sectional planes of the upstream and downstream of each rotor. Cross sectional flow patterns were investigated through the acquired data by the 45° inclined hot-wire. Flow characteristics such as tip vortex, secondary flow and tip leakage flow were confirmed through axial, radial and tangential velocity vector plot. Swirl velocity, which was generated by the front rotor, was recovered in the form of static pressure rise by the rear rotor except for hub and tip regions.

기호설명

A	: 팬의 환상 유로 면적, m^2	V_a	: 축방향 속도, m/s
B_T	: 데이터 측정 시간	V_e	: 유효 냉각 속도, m/s
CRF	: 엇회전식 축류팬	V_r	: 반경방향 속도, m/s
E	: 측정전압, volts	V_θ	: 원주방향 속도, m/s
N	: 회전수, rpm	\bar{V}	: 속도벡터의 크기, m/s
N_B	: 블레이드 수	x	: 축방향 거리
R	: 팬의 중심점에서 반경길이, mm	β	: 블레이드의 피치각, deg
R_{hub}	: 동익의 허브 반경, mm	γ	: 비틀림 각, deg
R_{tip}	: 동익의 팁 반경, mm	θ	: 캠버각, deg
T	: 블레이드 1passge 측정시간	θ_0	: 열선각, deg
U	: 평균반경에서의 블레이드 속도, m/s	θ_p	: 열선 프로브의 피치각, deg
U_{tip}	: 팁에서의 블레이드 속도, m/s	θ_y	: 열선 프로브의 요우각, deg
V	: 절대 속도, m/s	φ	: 절대 유동각, deg
		φ_e	: 열선프로브의 보정식의 매개변수

[†] 한양대학교 대학원 기계공학과

E-mail : rct1008@hotmail.com

TEL : (02)2290-1716 FAX : (02)2281-4016

* 한양대학교 대학원 기계공학과

** 한양대학교 대학원 기계공학과

*** 회원, 한양대학교 기계공학부

1. 서론

엇회전식 축류팬(counter rotating axial flow fan, CRF)은 높은 정압 상승을 필요로 하는 장소에 사용되는 2 단 축류팬의 일종으로, 비틀림 각이 정반대인 2 개의 동익이 서로 반대 방향으로

회전하는 축류 팬이다. 엠티회전식 축류팬의 전단 동익에서 발생한 선회속도 성분은 후단 동익에 의해 정압 성분으로 대부분 회수되므로 기존의 동익과 정익으로 구성 된 2 단 축류팬에 비해 유동손실이 비교적 작은 특징이 있다⁽¹⁾.

엠티회전식 축류팬의 고성능, 고효율 성능 향상을 목적으로 최근 몇 년간 성능 및 유동 특성에 관한 연구가 계속적으로 수행되어 왔다. 조진수 등⁽²⁾은 단회전식 및 엠티회전식 축류팬의 수치해석과 성능 실험을 수행하였다. 최진용 등⁽³⁾은 엠티회전식 축류팬의 성능 실험 및 시간 평균 3 차원 유동장을 측정하였다. 신현우 등⁽⁴⁾은 덕트없이 항공기 추진용으로 사용되는 엠티회전식 축류팬의 동익과 동익간의 상호 작용에 관한 연구를 수행하였다. 그러나, 엠티회전식 축류팬의 비정상 공력특성에 관한 연구는 아직까지 체계적으로 이루어지지 않았다.

본 연구에서는 엠티회전식 축류팬의 전단 동익과 후단 동익의 전, 후방에서 발생하는 복잡한 유동을 블레이드와 블레이드 사이의 유로(passage)를 기준으로 비교, 분석하여 비정상 공력특성을 파악하였다.

2. 실험 장치

엠티회전식 축류팬의 비정상 공력 특성을 측정하기 위한 실험장치는 KS B 6311⁽⁵⁾의 규격에 준하여 Fig. 1 과 같이 제작되었다. 실험 장치의 전체 길이는 7,650mm 이며, 팬의 직경과 테스트 덕트의 직경은 500mm 로 동일하게 제작되었다. 팬의 입구에는 흡입유동에 의한 손실을 줄이기 위해 벨 마우스가 설치되어 있다. 엠티회전식 축류팬은 전단동익과 후단 동익으로 구성되어 있다. 전단 동익의 블레이드 수는 8 개이고, 후단 동익의 블레이드 수는 7 개이다.

Fig. 2 는 엠티회전식 축류팬의 전, 후단 동익 블레이드를 나타낸 것이다. 전단 동익과 후단동익의 블레이드 비틀림각은 서로 반대방향으로 제작되었다. Table 1 은 전단 동익과 후단 동익 블레이드의 제원을 나타낸 것이다.

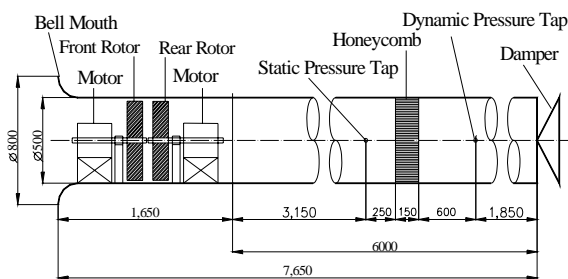
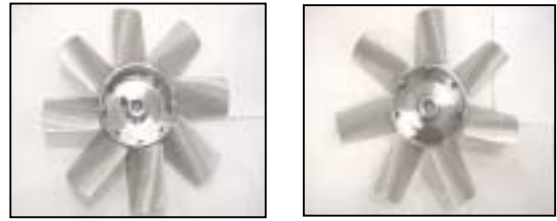


Fig. 1 Experimental apparatus(dimension : mm)



(a) Front rotor (NB=8) (b) Rear rotor (NB=7)

Fig. 2 Front view of the rotors

Table 1 Specification of the rotor blades

구 분	Front rotor	Rear rotor
Tip diameter	497 mm	497 mm
Hub diameter	200 mm	200 mm
Tip clearance	3 mm	3 mm
Airfoil	NACA65-series	
Camber angle	18 deg	
Thickness	10 % (=12.825 mm)	
Blade angle at 0.75 radius	38.0[deg]	36.0[deg]
Solidity at 0.75 radius	0.8	0.7
Number of blades	8	7

3. 실험 방법

본 연구에서는 엠티회전식 축류팬의 3 차원 비정상 공력특성을 파악하기 위해 전단 동익과 후단 동익의 전방과 후방에서 45° 경사 열선(slanted hot-wire)을 사용하여 3 차원 유동장을 측정하였다. 유동장 실험은 안광원 등⁽⁶⁾의 실험 결과를 바탕으로 엠티회전식 축류팬의 작동 설계점인 최고 효율점에서 수행 되었다.

3.1 열선프로브의 보정실험

엠티회전식 축류팬의 비정상 공력특성을 파악하기 위한 열선의 보정 실험은 Grand 와 Kool⁽⁷⁾의 방법을 이용하였다. 경사 열선에서의 유동 벡터와 열선 벡터 사이의 관계식은 다음과 같다.

$$\cos \phi = \cos \theta_0 \cdot \cos \theta_p \cdot \cos \theta_y + \sin \theta_0 \cdot \sin \theta_p \quad (1)$$

Fig. 3 은 경사 열선의 형상으로, 식 (1)에 사용된 여러 각도의 기준 좌표를 나타낸다. 열선과 유동이 수직을 이룰 경우, 유효냉각속도와 열선 유속계의 전압과의 관계는 다음과 같다.

$$E^2 = A + B \cdot V_e^n \quad (2)$$

여기서, E 는 전압, V_e 는 유효 냉각속도를 나타내며, A, B, n 은 속도와 전압과의 곡선적합(curve fitting)을 통해 얻어지는 상수 값이다.

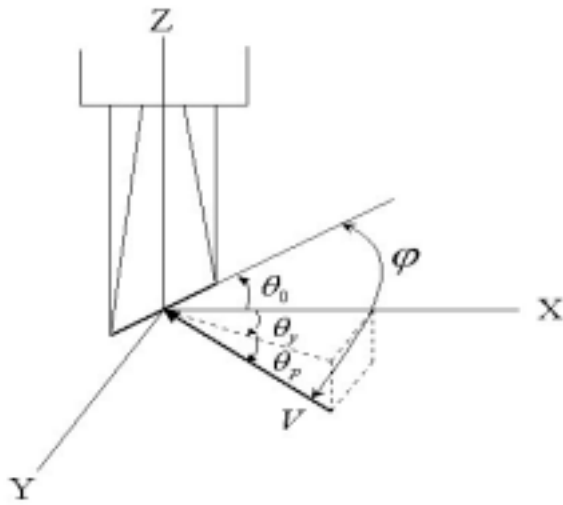


Fig. 3 Geometry of a slanted hot-wire

Grande 와 Kool⁽⁷⁾은 유효 냉각 속도와 실제 유동의 속도 비를 프로브 피치각, 요우각 및 유동각의 함수로 가정하여 다음의 식으로 표현하였다.

$$\frac{V_e}{V} = \cos \varphi_e \quad (3)$$

$$\sin \varphi_e = A_2 \cdot \cos \theta_p \cdot \cos\left(\frac{\theta_y}{A_1}\right) + A_2 \cdot \tan \theta_0 \cdot \sin \theta_p \quad (4)$$

여기서, φ_e 는 프로브 요우각의 보정실험을 통해 얻어지는 매개 변수이고, A_1, A_2 는 각각 보정식의 상수이다.

열선 프로브의 보정 실험은 개방형 풍동에서 수행되었다. 풍동의 난류강도(turbulence intensity)는 0.13%이다. 유효 냉각 속도에 대한 열선 유속계 속도와의 관계식을 구하기 위해 0m/s 에서 60m/s 의 속도에 이르기 까지 26 개의 측정점에서 보정 실험을 수행하였다. 보정 결과를 통해 식 (2)의 계수 A, B, n 의 값을 구하였으며, 결과는 Fig.4 에 나타내었다.

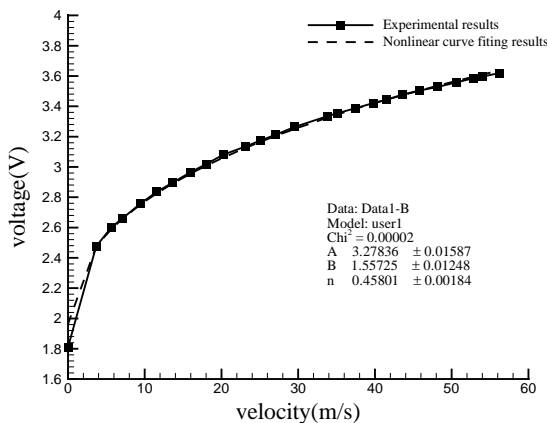


Fig. 4 Velocity calibration

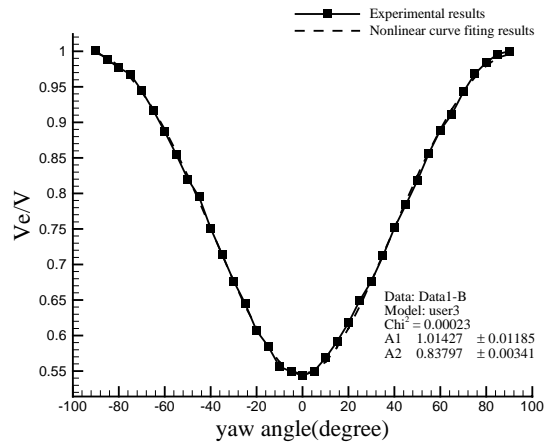


Fig. 5 Probe yaw angle calibration

경사형 열선 프로우브의 요우각 변화에 따른 실제 속도변화 경향을 구하기 위하여 실제 팬 유속과 비슷한 20m/s 의 속도에서 요우각을 $-90^\circ \sim +90^\circ$ 의 범위에서 5° 간격으로 변화시키며 출력 전압을 측정하였다. 이러한 프로브 요우각 보정 실험을 수행하여 식 (4)의 계수 A_1, A_2 의 값을 구하였으며, Fig. 5 에 이 결과를 나타내었다.

3.2 비정상 유동장 측정실험

엇회전식 축류팬의 비정상 유동장 측정실험은 전단 동익과 후단 동익 사이의 3 개의 단면에서 수행되었다. Fig. 6 은 비정상 유동장 측정 위치를 나타낸 것이다. 엇회전식 축류팬의 각각의 측정 위치에서 45° 경사 열선을 사용하여 반경 방향으로 총 23 포인트를 측정하였다. 각 측정점에서 3 차원 속도성분을 얻기 위하여 측정위치에서 열선을 3 방향으로 120° 회전시키면서 각 방향에 대한 주기적인 신호를 획득하였다. 블레이드 팁과 허브 부분에서는 정밀한 유동 계측을 위해 측정 간격을 좁게하였다.

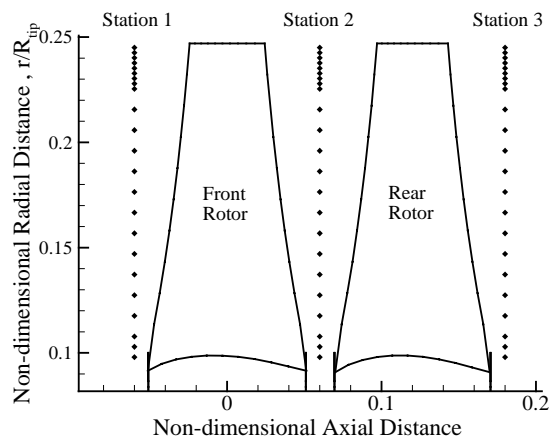


Fig. 6 Unsteady flow measurement positions

열선 프로브를 이용한 유동장 실험은 보정 실험 결과를 이용하여 수행되었다. 유동장 측정 실험에서는 30° 간격의 세 각도에서 측정한 결과를 식 (3)과 식 (4)를 이용하여 만든 비선형 방정식에 대입하여 해를 구하였다. 이 해를 이용하여 3 차원 비정상 유동장을 분석하였다.

3.3 데이터 획득 및 처리방법

열선에서 측정된 순간적 데이터를 처리하는 방법으로는 열선의 주기적인 신호를 디지털 값으로 바꾸고 같은 위상으로 평균하는 PLEAT(Phase Locked Ensemble Averaging Technique)방법을 사용하였다. 또한 데이터 시작 지점을 동일하게 맞추기 위하여 외부에 스톱 트리거를 사용하여 동일한 시점에서 데이터 획득을 시작하도록 하였다. 각 측정 지점에서 2000 개의 샘플링 데이터를 100Khz 처리속도로 측정하였다. 이러한 과정을 스톱 트리거를 통해 200 회 반복하여 ensemble averaging 과정을 거쳐 동일 시작점에서의 4.5 passage 동안의 데이터 값을 획득하였다. Fig.7 은 데이터 획득 과정을 나타낸 것이다.

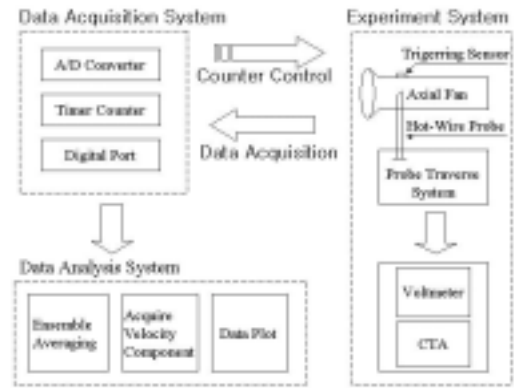
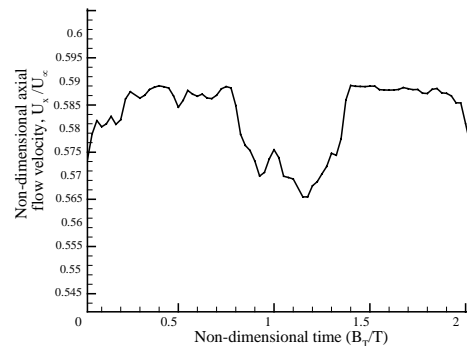
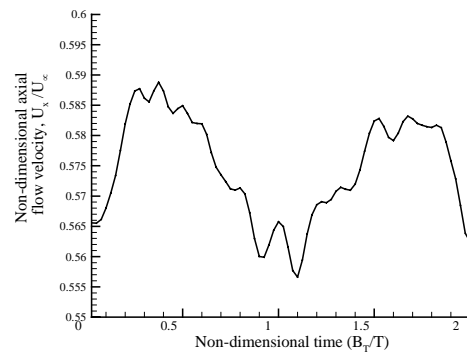


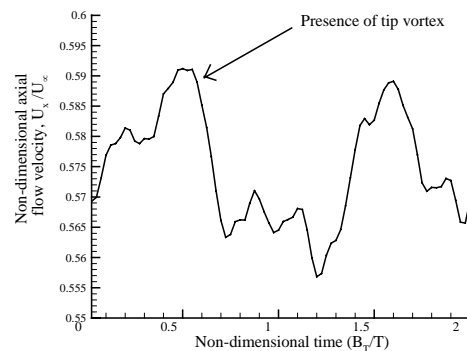
Fig. 7 Schematic diagram of Hot-wire data acquisition



(a) r/R=0.76



(b) r/R=0.44



(c) r/R=0.99

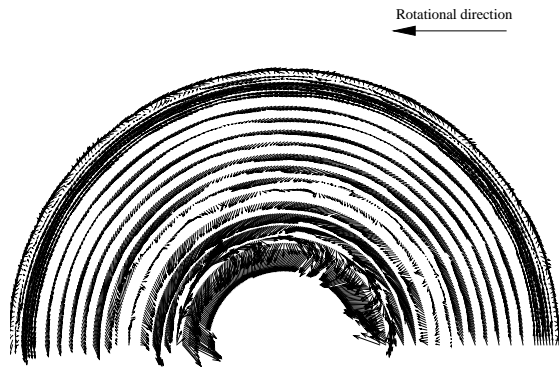
Fig. 8 Normalized axial velocities at station2

4. 결과 및 고찰

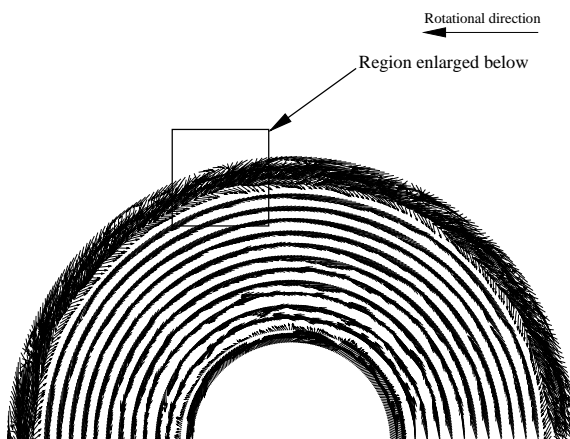
엇회전식 축류팬의 3 차원 비정상 공력특성을 파악하기 위해 전단 동익과 후단 동익의 전방과 후방에서 45° 경사 열선을 사용하여 3 차원 유동장을 측정하였다. Fig.8 은 블레이드와 블레이드 사이의 2 개의 passage 영역을 무차원화하여 나타낸 것이다. Fig.8 의 (a)는 블레이드의 평균반경에서 측정된 결과로 블레이드 후류의 형상이 균일하게 나타나며, 안정적이고 주기적인 경향을 나타내었다. Fig.8 의 (b)와 (c)는 허브와 팁 부분을 나타낸 것으로, (b)에서는 허브 경계층의 영향으로 속도값이 떨어져가는 모습을 확인 할 수 있었다. 또한 (c)의 팁 영역에서 passage 마지막 부분에 팁 와류의 영향으로 그림에서 표시한 것처럼 블록한 부분에서 축 방향 속도 성분이 증가된 것을 확인 할 수 있었다. 이는 와류가 생성되기 직전에 회전방향의 반대로 유동이 변화되는 과정에서 상대적으로 축 방향 속도성분이 증가되었기 때문이다.

Fig.9 는 전단 동익과 후단 동익 사이의 축방향으로 3 가지의 단면에서 선회속도성분과 원주방향 속도성분을 이용하여 벡터 성분을 나타낸 그림이다.

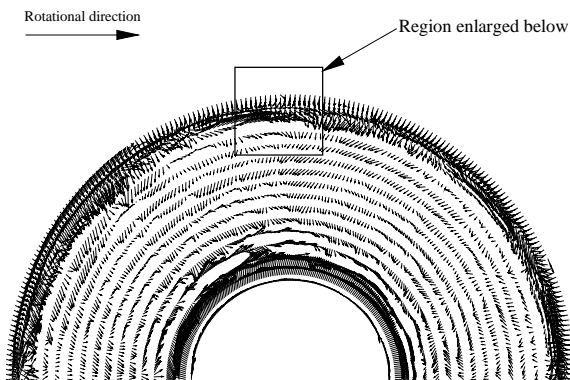
Fig. 9의 (a), (b), (c)는 각각 전단 동익 전방과 후방 그리고 후단 동익의 후방에서 측정된 유동장의 벡터성분으로, 총 4.5 개의 passage 영역을 나타낸 것이다. Fig. 9의 (a)와 (b)에서 보면 블레이드가 회전하여 지나가는 순간에 선회속도성분이 급격히 증가하고 상대적으로 원주방향 속도성분이 작아지는 것을 알 수 있었다. Fig. 9의 (b)는 전단 동익과 후단 동익의 상호작용에 의한 영향으로 Fig. 8의 (a)에 비해 passage 구분이 명확히 표현되지 않고 선회방향 속도벡터만이 나타남을 확인하였다.



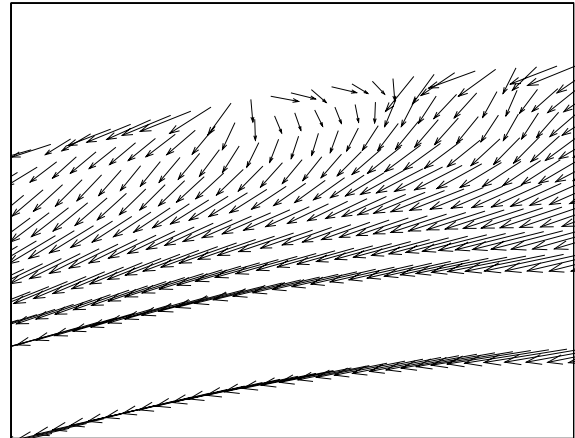
(a) Cross flow at station 1



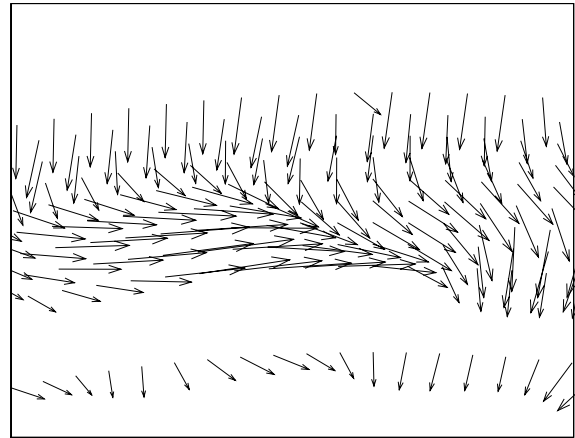
(b) Cross flow at station 2



(c) Cross flow at station 3



(d) Enlarged region at station 2



(e) Enlarged region at station 3

Fig. 9 Radial-tangential velocities vectors

Fig. 9의 (c)에서 보면, 전단 동익에 의해 발생된 선회속도 성분이 후단 동익에 의해 대부분 제거됨을 볼 수 있다. 그러나, 허브부분과 팁 부분에서는 원주방향 성분이 크게 나타나고 있는데 이것은 후단 동익의 회전으로 인해 발생한 것이다. 또한, 팁부분 보다 허브부근에서 선회속도성분이 감소하여 상대적으로 원주방향 속도성분이 증가되는 경향을 보이고 있다. Fig. 9의 (b)와 (c)에서 보면, 블레이드 회전에 의해 각각의 passage 마다 팁 부분에서 회전방향과 반대 방향으로 형성되는 팁 와류를 확인 할 수 있으며, 이것을 Fig. 9의 (d)와 (e)에 확대하여 나타내었다.

5. 결론

본 연구에서는 엇회전식 축류팬의 비정상 유동장을 측정하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 엇회전식 축류팬의 블레이드 팁 영역에서 와류가 생성되기 직전에 회전방향과 반대로 유동이 변화되는 과정에서 상대적으로 축방향 속도성분이

증가됨을 확인하였다.

- (2) 엠티전식 축류팬의 전단 동익 블레이드가 회전하여 지나가는 순간에 선회속도성분이 급격히 증가하고 상대적으로 원주방향 속도성분이 작아지는 것을 알 수 있었다.
- (3) 엠티전식 축류팬의 전단 동익에 의해 발생된 선회속도 성분이 후단 동익에 의해 대부분 제거됨을 볼 수 있다. 그러나, 허브부분과 팁 부분에서는 원주방향 성분이 크게 나타나고 있는데, 이것은 후단 동익의 회전으로 인해 발생한 것이다.
- (4) 엠티전식 축류팬의 블레이드 회전에 의해 각각의 passage 마다 팁 부분에서 회전방향과 반대 방향으로 형성되는 팁 와류를 확인 할 수 있었으며, 전단 동익의 후방에서 팁 와류의 형성이 더욱 두드러졌다.

후 기

본 연구는 2001 년도 에너지관리공단 학술진흥사업(과제번호 2001-E-ID03-P-04)의 지원으로 연구 되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Kodama, Y., Hayashi, H., Fukano, T., and Tanaka, K., 1994, "Experimental Study on the characteristics of Fluid Dynamics and Noise of a Counter Rotating Fan," *Transactions of the JSME(B)*, Vol. 60, No. 576, pp. 2764~2777.
- (2) Jinsoo Cho, Yuphil Won and Mooncheol Lee, 2000, "Numerical and Experimental Analyses of the Aerodynamic Characteristics of a Counter Rotating Axial Fan," *Transactions of the KSME*, Vol. 24, NO. 3, pp. 325-337.
- (3) Jinyong Choi, Leesang Cho, Jinsoo Cho and Yuphil Won, 2002, "Experimental Study on the Aerodynamic Characteristics of a Counter-Rotating Axial Fan," *Transactions of the KSME, B*, Vol. 26, NO.2, pp. 201~210.
- (4) Hyounwoo Shin, Charlotte E, Whitfield and David C Wisler, 1994, "Rotor-Rotor Interaction for Counter-Rotating Fans, Part 1: Three-Dimensional Flow field Measurements," *AIAA*, Vol. 32, No. 11, pp 2224-2233
- (5) KS B 6311, *Testing methods for turbo-fans and blowers*, 1982 Korea Standard Association.
- (6) Kwangweon Ahn, Leesang Cho, Hyunsoo Park 문 Jinsoo Cho, 2002, "Experimental Study on the Aerodynamic Characteristics of Axial-Type In-line Duct Fans," *Proceedings of the KAMES 2002 joint symposium A*, pp 1990-1996.
- (7) G De Grande and P Kool, 1981, "An improved experimental method to determine the complete

- Reynolds stress tensor with a single rotating slanting hot wire," *The Institute of Physics*, Vol. 14, pp.196-201.
- (8) Raecho Kang, Wuijun Chung, 1990, "Flow Field Behind an Axial Compressor Rotor," *Transactions of the KSME*, Vol 15, No 3, pp 963-969.
- (9) Wallis, R. A., 1983, *Axial flow fans and ducts*, John Wiley & Sons Inc.
- (10) H. H. Bruun, 1995, *Hot-wire anemometry*, Oxford University Press.
- (11) S. Kang, C Hirsch, 1993, "Experimental Study on the Three-Dimensional Flow Within a Compressor Cascade With Tip Clearance:Part 1-Velocity and Pressure Fields", *Journal of Turbomachinery*, Vol 115, pp 435-443.
- (12) Sungwon Kim, 1996, "Study on Three-Dimensional Flow within a Centrifugal Compressor Impeller," Ph. D Thesis, University of Yonsei, Seoul, Korea.