

엇회전식 축류팬의 공력 특성에 관한 실험적 연구

최진용*, 조이상*, 조진수**, 원유필***

Experimental Study on the Aerodynamic Characteristics of a Counter-Rotating Axial Fan

Jinyong Choi, Leesang Cho, Jinsoo Cho, Eupil Won

Key Words : counter-rotating axial flow fan(엇회전식 축류팬), five-hole probe(5공 프로우브), pressure coefficient(압력계수)

Abstract

The experiments of the Aerodynamic characteristics of a counter-rotating axial fan were carried out. The performance tests of a single and a counter-rotating axial fan were carried out based on the Korean Standard Testing Methods for Turbo-fans and Blowers(KS B 6311). The performances of single and counter-rotating axial fans were obtained and compared with each other. The flow fields of a counter-rotating axial fan at the peak efficiency point were measured using a five-hole probe. As a result, compared with the performance of a single-rotating axial fan, that of a counter-rotating axial fan was superior. And it is confirmed that most of the swirl flow generated by the front rotor was eliminated by the rear rotor

기호설명

<p>A : 팬의 환상 유로 면적, m^2</p> <p>C : 시위길이, mm</p> <p>C_m : 동익의 평균반경에서 시위 길이, mm</p> <p>$C_{p, pitch}$: 피치각 계수</p> <p>$C_{p, static}$: 정압 계수</p> <p>$C_{p, total}$: 전압 계수</p> <p>$C_{p, yaw}$: 요우각 계수</p> <p>CRF : 엇회전식 축류팬</p> <p>N : 회전수, rpm</p> <p>L : 축동력, kW</p> <p>N_B : 블레이드 수</p> <p>P : 평균 압력, mmH_2O</p> <p>ΔP_s : 정압 상승, mmH_2O</p> <p>ΔP_T : 전압 상승, mmH_2O</p>	<p>Q : 체적 유량, m^3/s</p> <p>r : 팬의 중심점에서 반경길이, mm</p> <p>R_{hub} : 동익의 허브 반경, mm</p> <p>R_m : 동익의 평균 반경, mm</p> <p>R_{tip} : 동익의 팁 반경, mm</p> <p>s : 블레이드 간격 = $2\pi r / N_B$, mm</p> <p>SRF : 단회전식 축류팬</p> <p>U : 평균 반경에서의 블레이드 속도, m/s</p> <p>U_{tip} : 블레이드 팁에서의 속도, m/s</p> <p>V : 절대 속도, m/s</p> <p>V_a : 축방향 속도, m/s</p> <p>V_r : 반경방향 속도, m/s</p> <p>V_θ : 원주방향 속도, m/s</p> <p>\bar{V} : 속도벡터의 크기, m/s</p> <p>W : 상대 속도, m/s</p> <p>α : 5공 프로우브의 피치각, deg</p> <p>β : 블레이드의 피치각, deg</p> <p>γ : 비틀림 각, deg</p> <p>δ : 5공 프로우브의 요우각, deg</p> <p>η : 팬 효율 = $\Delta P_T Q / L$</p>
--	---

* 회원, 한양대학교 대학원 기계공학과

** 회원, 한양대학교 기계공학과

*** ㈜ 동원 FEP

- θ : 캠버각, deg
- λ : 축동력 계수 = $2L/\rho U^3 A$
- ν : 허브비 = R_{hub}/R_{tip}
- ρ : 공기 밀도, kg/m^3
- σ : 현절비 = C/s
- ϕ : 유량 계수 = Q/UA
- ψ : 압력 계수 = $2\Delta P_1/\rho U^2$

Subscripts

- F : 전단 동익
- R : 후단 동익
- 1 : 입구
- 2 : 출구

1. 서론

엇회전식 축류팬(counter rotating axial fan, CRF)은 2개의 동익(rotor)을 서로 반대방향으로 회전시키는 2단 축류팬(two stage axial fan)으로서 정익(stator)대신 후단 동익을 갖는다. 전단 동익에서 생긴 선회속도(swirl velocity)성분의 에너지를 후단 동익에서 정압성분으로 회수하므로 유동손실이 작고, 특히 유량계수가 큰 영역에서는 보통의 2단 축류팬에 비해 효율이 높은 특징을 나타낸다⁽¹⁾. 따라서, 엇회전식 축류팬은 소형과 저속 회전으로 한 개의 동익만을 가지는 단회전식 축류팬(single-rotating axial fan, SRF)뿐만 아니라, 보통의 2단 축류팬에 비해서도 비슷한 출력을 얻으면서, 높은 효율을 유지할 수 있다.

엇회전식 시스템에 대한 연구는 주로 미국 NASA에서 항공기 추진용 프로펠러에 적용되어 행하여졌다. Biermann 등⁽²⁾은 4개와 6개의 블레이드 수를 가진 단회전식 프로펠러(single-rotating propeller) 및 엇회전식 프로펠러(counter-rotating propeller)를 풍동실험을 통하여 엇회전식 프로펠러가 단회전식 프로펠러에 비해 최고 6%의 효율향상을 가짐을 확인했으며, Kodama 등⁽³⁾은 1단 축류팬, 2단 축류팬 그리고 엇회전식 축류팬의 성능 및 소음에 대한 실험을 통해 엇회전식 축류팬의 효율 및 성능이 우수하다는 결론을 얻었다. 조진수 등⁽¹⁾은 단회전식 및 엇회전식 축류팬의 수치해석 및 실험을 통해 엇회전식 축류팬의 성능 특성에 대해 연구하였다. Shin 등⁽⁴⁾은 엇회전식 팬의 공력 상호작용에 대한 정상 및 비정상 3차원 유동장을 측정하여 엇회전식 팬의 유동 특성에 대한 연구를 수행하였다.

본 연구는 엇회전식 축류팬에 대한 성능 및 유동장 실험을 통하여, 단회전식 축류팬에 비한 성

능의 향상을 확인하고, 엇회전식 축류팬의 유동 특성을 파악하는데 있다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험 장치

엇회전식 축류팬의 실험 장치는 KS B 6311⁽⁵⁾ 규격에 근거하여 Fig. 1과 같이 제작되었다.

실험 장치의 전체 길이는 14053mm 이고, 팬의 직경은 800mm 이고, 덕트의 직경은 900mm 이다. 팬의 입구에는 벨 마우스(bell mouse)를 설치하였으며, 덕트의 토출구에는 유량을 조절할 수 있는 댐퍼(damper)를 설치하였다. 전단 동익과 후단 동익은 두 개의 모터에 의해 서로 반대의 회전방향으로 구동된다. 팬과 테스트 덕트 사이에는 확대관을 설치하였으며, 길이는 450mm 이다. 정류격자 전방에는 정압을 측정하기 위한 구멍이 있으며, 후방에는 피토크관(pitot tube)을 넣어 동압을 측정할 수 있는 구멍이 위치해 있다.

Fig. 2는 실험에 사용된 엇회전식 축류팬의 전단 동익으로, 전단 동익의 블레이드 수는 9개, 후단 동익의 블레이드 수는 7개이다. 블레이드는 알루미늄으로 주물 제작되었다.

Table. 1은 엇회전식 축류팬에 사용된 전, 후단 블레이드의 제원을 나타낸 것이다. 동익의 블레이드는 NACA 65 계열의 익형(airfoil)으로 캠버 각

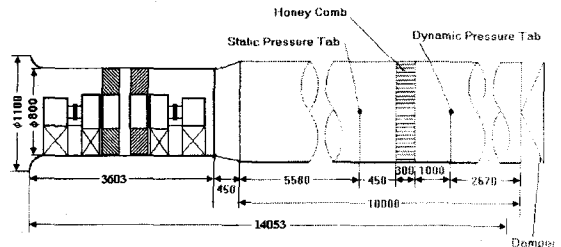


Fig. 1 Experimental apparatus, dimensions in mm.

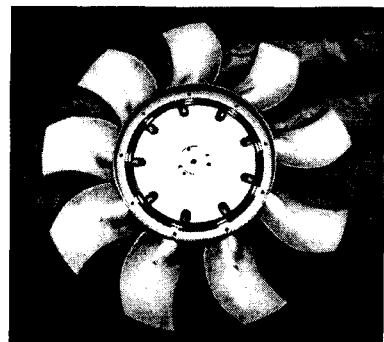


Fig. 2 Front view of the front rotor

Table 1. Dimensions of the tested fan blades

<front rotor>				
r/R _{tip}	Chord length (mm)	Blade angle (deg)	Thickness (mm)	Solidity (=C/s)
0.5 (hub)	176.1	47.0	11.9	1.261
0.75 (mean)	147.9	36.1	10.7	0.706
1.0 (tip)	119.7	29.6	7.8	0.429

<rear rotor>				
r/R _{tip}	Chord length (mm)	Blade angle (deg)	Thickness (mm)	Solidity (=C/s)
0.5 (hub)	208.8	47.0	14.2	1.631
0.75 (mean)	175.4	36.1	12.3	0.651
1.0 (tip)	142.0	29.6	10.1	0.395

(camber angle, θ) 은 15° 이며, 동익의 팁 반경(rotor tip radius, R_{tip})은 400mm, 허브의 반경(rotor hub radius, R_{hub})은 200mm로 허브비(hub tip ratio, ν)는 0.5이다. 그리고 동익의 평균 반경(mass averaged mean radius, R_m)에서 현질비(solidity, σ)는 0.706이다.

Fig. 3은 엽회전식 축류팬의 평균 반경에서의 속도 삼각형을 나타낸 것이다. 여기서 V , W , V_a , U 는 각각 절대 속도(absolute velocity), 상대 속도(relative velocity), 축방향 속도(axial velocity), 블레이드 속도(blade speed)이다.

2.2 실험 방법

2.2.1 성능 측정 방법

엽회전식 축류팬의 성능 측정 실험은 KS B 6311⁽¹⁵⁾의 표준화된 규격에 준하여 팬의 성능에 영향을 미치는 설계 변수들을 변화시키며 수행되었다.

정압은 Fig. 1의 측정 관로 좌우 두 지점에서 압력 탭(pressure tap)을 이용하여 측정되었고, 동압은 측정 관로단면의 상하좌우에서 각각 5개씩 총 20개 지점에서 측정되었다. 측정된 동압을 유량으로 환산하기 위해서는 공기의 밀도측정이 필요하다. 공기의 밀도는 공기의 온도와 습도 그리고 대기압을 측정하여 Wallis⁽⁶⁾의 밀도 보정 방법에 따라 공기의 밀도를 계산하였다. 축동력은 ONO SOKKI의 SS-501 토크미터를 이용하여 토크와 회전속도를 측정하여 계산하였다. 이러한 과정은 댐퍼로 유량을 조절하면서 반복되었으며, 측정된 압력, 유량 그리고 축동력 등은 팬의 회전수에 따라 변하므로 AMCA Standards 201⁽⁷⁾의 팬 법칙(fan laws)을 이용하여 보정하였다.

성능 실험은 먼저 블레이드 수가 9개인 단회전식 축류팬에 대해 수행되었다. 동익의 피치각(pitch angle, β)을 변화시키면서 성능 실험을 수행

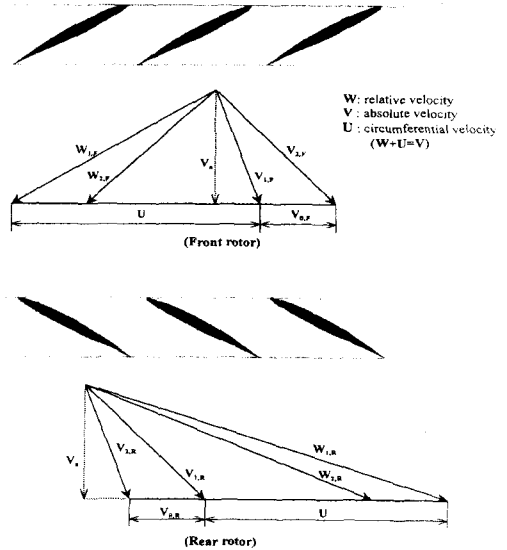


Fig. 3 Velocity triangles at the mean radius for a counter-rotating axial fan

하였으며, 엽회전식 축류팬의 경우에는 단회전식 축류팬의 성능 실험을 바탕으로 최고 효율을 가지는 전단 동익의 피치각을 고정시킨 상태로 후단 동익의 피치각을 변화시키면서 성능 실험을 수행하였다.

성능 실험 결과는 유량 계수(flow coefficient, ϕ), 압력 계수(pressure coefficient, ψ), 축동력 계수(shaft power coefficient, λ) 그리고 팬 효율(fan efficiency, η) 등으로 무차원화하였다.

$$\text{유량 계수, } \phi = \frac{Q}{U_{tip} A}$$

$$\text{압력 계수, } \psi = \frac{\Delta P_T}{\frac{1}{2} \rho U_{tip}^2}$$

$$\text{축동력 계수, } \lambda = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho U_{tip}^3 A}$$

$$\text{팬 효율, } \eta = \frac{Q \cdot \Delta P_T}{L} = \frac{\phi \psi}{\lambda}$$

여기서, Q 는 유량(volumetric flow rate), ΔP_T 는 전압 상승(total pressure rise), L 은 축동력(shaft power) 그리고 A 는 팬의 환상 유로 면적(fan annulus area)이다.

2.2.2 유동장 측정 방법

엽회전식 축류팬의 유동장 측정 실험에서는 프리즘형 5공 프로우브(five-hole probe)를 사용하여 시간 평균 3차원 유동장을 측정하였으며, 5공 프로우브의 보정 실험은 개방형 풍동에서 Treaster와

3. 결과 및 고찰

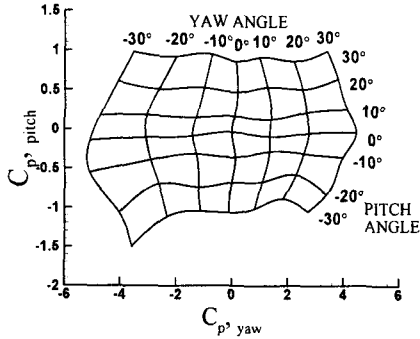


Fig. 4 Typical calibration data $C_{p, pitch}$ VS $C_{p, yaw}$

Yocum⁽⁸⁾ 과 Dominy 와 Hodson⁽⁹⁾ 의 방법을 이용하여 수행되었다. 5 공 프로우브의 요우각(yaw angle, δ)과 피치각(pitch angle, α)을 $+30^\circ$ 에서 -30° 까지 10° 씩 변화시키며 5 개 압력공의 압력을 측정하였으며, 정압과 전압은 피토판을 사용하여 측정하였다. 이렇게 얻어진 압력들로부터 다음과 같은 보정계수들을 얻을 수 있다.

$$\text{피치각 계수, } C_{p, pitch} = (p_2 - p_3) / (p_1 - \bar{p})$$

$$\text{요우각 계수, } C_{p, yaw} = (p_4 - p_5) / (p_1 - \bar{p})$$

$$\text{전압 계수, } C_{p, total} = (p_1 - p_{total}) / (p_1 - \bar{p})$$

$$\text{정압 계수, } C_{p, static} = (\bar{p} - p_{static}) / (p_1 - \bar{p})$$

$$\text{평균 압력, } \bar{p} = (p_2 + p_3 + p_4 + p_5) / 4$$

여기서, P_{total} 는 전압, P_{static} 는 정압 그리고 $P_1 \sim P_5$ 는 5 공 프로우브 각 압력공에서의 압력을 나타낸다.

Fig. 4 는 5 공 프로우브의 요우각과 피치각을 변화시키며 얻은 보정 계수와 보정도를 나타낸 것이다.

엇회전식 축류팬의 3 차원 유동장 실험은 팬 효율이 가장 높은 최고 효율점(peak efficiency point)에서 수행되었으며, 전단 동익의 전연과 후연 그리고, 후단 동익의 후연에서 10mm 떨어진 위치에서 5 공 프로우브를 반경 방향으로 9mm 씩 이송시키며 21 개의 측정 위치에서 측정하였다.

팬의 좌표축 방향의 속도 성분은 다음과 같이 계산된다.

$$\text{축방향 속도, } V_a = \bar{V} \cos \alpha \cos \delta$$

$$\text{반경 방향 속도, } V_r = \bar{V} \sin \alpha$$

$$\text{원주 방향 속도, } V_\theta = \bar{V} \cos \alpha \sin \delta$$

여기서, \bar{V} 는 유동장의 속도벡터의 크기를 나타낸다.

3.1 성능 실험 결과

Fig. 5 는 단회전식 축류팬의 실험 결과로 평균 반경에서 동익의 피치각을 29° , 31° , 33° 로 변화시키면서 팬의 성능 및 효율을 비교한 것이다.

피치각이 29° 인 경우에 최고 효율이 약 66.2%, 31° 인 경우에 최고 효율이 약 68.2%, 33° 인 경우에는 최고 효율이 약 67.6%로 피치각이 31° 일 때 다른 피치각에 비해 효율이 약 1~2% 정도 높은 실험 결과를 얻었다.

엇회전식 축류팬은 일반적으로 전단 동익과 후단 동익이 동일한 축동력을 소모하도록 후단 동익의 피치각이 전단 동익보다 작게 설계된다.⁽⁶⁾

Fig. 6 은 엇회전식 축류팬의 실험 결과로 평균 반경에서 전단 동익의 피치각을 31° 고정시키고, 회전수가 1790rpm 인 경우 후단 동익의 피치각을 27° , 29° , 31° 로 변화시키며 팬의 성능 및 효율을 비교한 것이다. 후단 동익 피치각이 27° 인 경우에 최고 효율이 약 81.8%, 29° 인 경우에 최고 효율이 약 83.2%, 31° 인 경우에는 최고 효율이 약 80.8%로 후단 동익의 피치각이 29° 일 때 다른 피치각에 비해 효율이 약 1~2% 정도 높은 실험 결과를 얻었다.

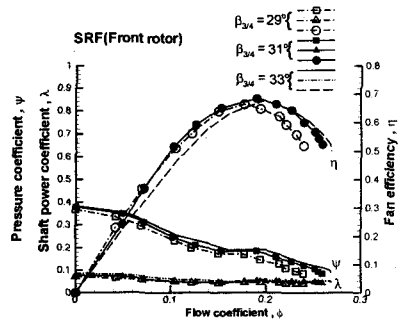


Fig. 5 Performance curves of a SRF for various rotor pitch angles

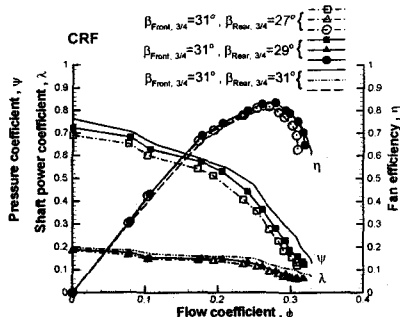


Fig. 6 Performance curves of a CRF for various rear rotor pitch angles

단회전식 축류팬과 엇회전식 축류팬의 성능 특성을 비교해 보면, 최고 효율일 때 엇회전식 축류팬이 단회전식 축류팬에 비해 유량이 약 1.5 배 높으며, 압력 상승은 약 1.52 배가 높다. 이러한 결과는 후단 동익이 전단 동익의 선회속도 성분의 에너지를 후단 동익에서 정압 성분으로 회수하는 엇회전식 축류팬의 유동 특성에 기인되는 것으로, 5공 프로우브를 이용한 유동장의 측정을 통해 확인할 수 있었다.

3.2 유동장 실험 결과

Fig. 7은 엇회전식 축류팬의 최고 효율점에서 전단 동익으로 유입되는 3차원 속도분포를 나타낸 것이다. 축방향 속도성분이 전반적으로 균일하게 발생하고 있지만, 허브 부분에서는 원주방향 및 반경방향의 속도성분이 크게 나타남을 볼 수 있는데, 이 현상은 전단 동익 앞의 모터에서부터 발생하는 유동박리(flow separation)에 기인된 것으로 보인다.

Fig. 8은 엇회전식 축류팬의 최고 효율점에서 전단 동익의 출구 유동을 측정된 실험 결과이다. 전반적으로 원주방향의 속도 성분이 매우 크게 증가한 것을 볼 수 있다. 또한, 와류의 영향에 의해 허브 부분과 팁 부근에서 원주방향의 속도성분이 증가하는 것을 확인할 수 있다.

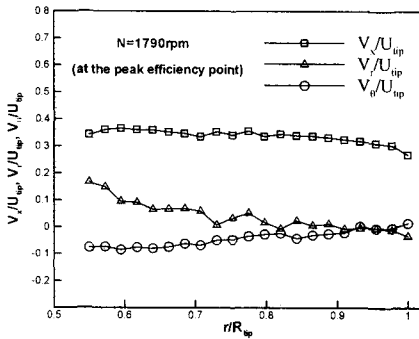


Fig. 7 Upstream velocity profiles before the front rotor (CRF, $\phi=0.4243$)

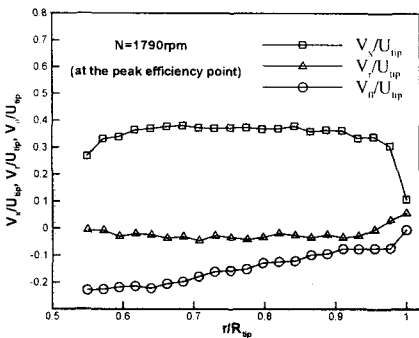


Fig. 8 Downstream velocity profiles behind the front rotor (CRF, $\phi=0.4243$)

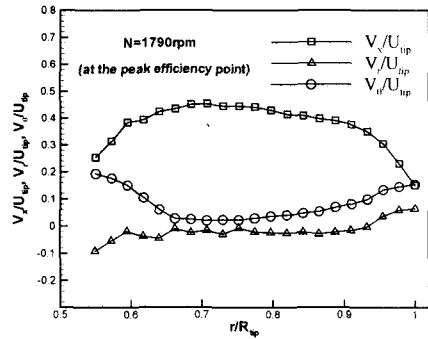


Fig. 9 Downstream velocity profiles behind the rear rotor (CRF, $\phi=0.4243$)

Fig. 9는 엇회전 회전식 축류팬의 최고 효율점에서 후단 동익의 출구 유동을 측정된 실험 결과이다. 전단 동익에서 발생했던 원주방향의 속도 성분이 감소됨을 볼 수 있다.

Fig. 10은 엇회전식 축류팬의 최고 효율점에서 전단 동익의 출구 유동의 원주방향과 반경방향의 속도벡터를 나타낸 것이다. 전반적으로 원주방향의 속도 성분이 크게 증가함을 확인할 수 있고, 팁 부근에서는 반경방향의 속도성분이 크게 나타남을 볼 수 있다.

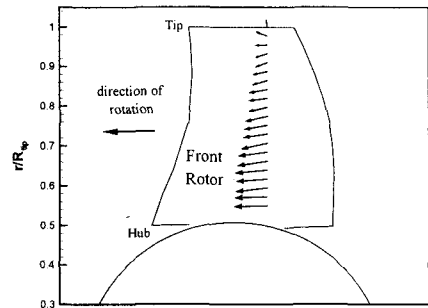


Fig. 10 Tangential and radial velocity vector behind the front rotor

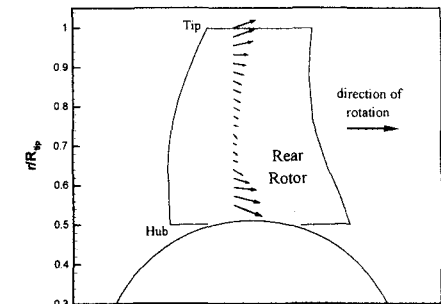


Fig. 11 Tangential and radial velocity vector behind the rear rotor

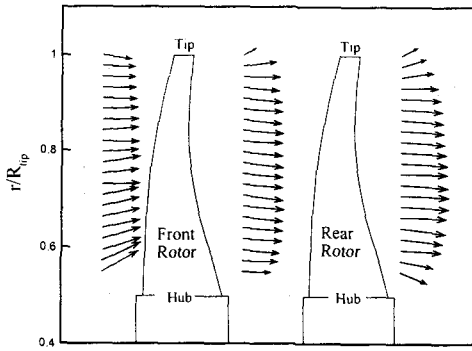


Fig. 12 Axial and radial velocity vector of the counter-rotating axial fan

Fig. 11 은 엇회전식 축류팬의 최고 효율점에서 후단 동익의 출구 유동의 원주방향과 반경방향의 속도벡터를 나타낸 것이다. 원주방향의 속도 성분이 허브 부분과 팁 부분을 제외하고 현저히 감소한 것을 볼 수 있다.

Fig. 12 는 엇회전식 축류팬의 최고 효율점에서 축방향과 반경방향의 속도벡터를 나타낸 것이다. 후단 동익의 출구 유동에서 축방향 속도 성분이 증가함을 볼 수 있고, 동익의 허브와 팁 부근에서는 와류로 인한 축방향 속도 성분의 감소를 확인할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 단회전식 축류팬과 엇회전식 축류팬에 대한 성능 시험을 수행하였으며, 엇회전식 축류팬의 유동장 측정 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 단회전식 축류팬과 엇회전식 축류팬에 대한 성능 시험 결과, 엇회전식 축류팬이 단회전식 축류팬보다 고유량 영역에서 좋은 효율을 가졌으며, 최고 효율점에서의 효율은 약 15% 높은 것으로 나타났다.

(2) 엇회전식 축류팬은 후단 동익이 전단 동익에서 발생하는 선회속도 성분을 축방향 속도 성분으로 회수하는 유동 특성을 가졌으며, 이러한 유동 특성은 성능향상에 기여함을 알 수 있었다.

(3) 전단 동익으로 유입되는 유동은 동익의 앞에 위치한 모터에서 발생한 유동박리로 인하여, 전단 동익의 허브부분에서 원주방향 및 반경방향의 속도성분이 크게 나타남을 볼 수 있었다.

(4) 전단 및 후단 동익의 허브부분과 팁부분에서 발생한 와류의 영향으로 출구 유동의 축방향 속도성분은 감소하고, 원주방향과 반경방향의 속

도성분은 증가함을 볼 수 있었다.

참고문헌

- (1) 조진수, 원유필, 이문철, 2000, " 엇회전식 축류팬의 공력특성에 관한 전산해석 및 실험," 대한기계학회 논문집 B 권, 제 24 권, 제 3 호, pp.325-337.
- (2) Biermann, D., and Hartman, E. P., "Wind Tunnel tests for Four- and Six-Blade Single- and Dual-Rotating Tractor Propellers", 1942, NACA Report 747.
- (3) 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," 일본기계학회 논문집 (B 편), 60 권 576 호, pp. 2764-2777.
- (4) Shin, H. W., Whitfield, C. E., and Wisler, D. E., "Rotor-Rotor Interaction for Counter-Rotating Fans, Part 1: Three-Dimensional Flowfield Measurements", 1994, AIAA J., Vol. 32, No. 11, pp.2224-2233.
- (5) 공업진흥청, 1982, "송풍기의 시험 및 검사 방법," KS B 6311.
- (6) Wallis, R. A., 1983, "Axial flow fans and ducts," John Wiley & Sons Inc.
- (7) AMCA Standards 201, 1985, "Fans and Systems," Air Movement and Control Association International, Inc.
- (8) Treaster, A. L. and Yocum, A. M., 1979, "The Calibration and Application of Five-hole Probes," ISA Transactions, Vol. 18, NO.3, pp. 23-34.
- (9) Dominy, R. G., and Hodson, H. P., 1993, "An Investigation of Factors Influencing the Calibration of Five-Hole Probes for Three-Dimensional Flow Measurements," Journal of Turbomachinery, Vol. 115, pp.513-519.