

축류송풍기의 동익과 정익 사이 간격변화에 따른 유동간섭에 관한 연구

임인원* · 선호수** · 주원구*** · 조강래****

A Study of rotor-stator interaction in an axial fan

Inwon-Won Rim, Won-Gu Joo and Kang-Rae Cho

Keywords : Rotor-stator Interaction(동익과 정익의 상호작용), Axial Fan(축류 송풍기), Performance(성능), Hot wire(열선), Kiel probe(키엘총압관)

Abstract

The flow inside an axial turbomachinery must be unsteady. Rotor-stator interaction by two blade rows influences performance, the generation of noise and vibration. So, it will be necessary to study the rotor-stator interaction for the design of an axial fan in which the axial gap between two blade rows is small. In this study, rotor-stator interaction is investigated by experimental methods. The research fan has one stage which consists of 24 rotor blades and 22 stator blades. Three-dimensional velocities measured using 45° slanted hot wire probe and total pressure is measured using Kiel total pressure probe between rotor and stator with the axial 25%, 55%, 145% of chord length. This study describes the influence of rotor-stator gap on the flow pattern, performance and loss.

The efficiency curve show that the change of the rotor-stator gap make difference in the efficiency. And, the 3-dimensional velocity distribution show that the potential interaction between the rotor and the stator have a great effect on the flow field downstream of rotor, where there are wake flow, various vortices in hub region and leakage vortex in casing region etc.

기호설명

C_{PT} 전압상승계수

ϕ 유량계수

U 날개 속도

V 공기 절대속도

W 공기 상대속도

P_T 총압

$\overline{P_T}$ 유량평균 총압

\overline{V} 유량평균 속도

r 반경방향위치

R_c 케이싱 반경

y 날개에 대한 원주방향 상대위치

s 피치

그리스 문자

β 날개 출구 상대유동각

η 유량평균 효율

* 연세대학교 대학원 기계공학과
 ** 현대정공
 *** 연세대학교 기전공학부
 **** 연세대학교 기전공학부

- 하첨자
- 1 날개입구
- 2 날개출구
- x 축방향
- t 회전방향, 원주방향
- s 원주방향으로 평균한 속도
- r 반경방향

1. 서론

축류 송풍기 내부의 실제적인 유동은 비정상(unsteady)이다. 동익 후방에서는 익표면의 경계층의 영향으로 축방향 속도가 급격히 감소하는 후류가 발생하며, 이 후류는 축방향으로 진행하면서 감쇠되지만, 동익과 정익사이의 거리가 짧아짐으로 정익의 유입 유동장에 영향을 미치게 된다. 또한 동익과 정익의 상대운동으로 인해 유동장의 상호간섭이 일어나고, 이러한 간섭은 축류 송풍기 유동장내의 비정상성을 발생시키는 요인이 된다.

이러한 요인들로 인해 익렬의 양력 변화가 생기며, 이는 축류 송풍기의 효율뿐만 아니라 익의 진동과 소음이 생기게 되어 기계 효율의 감소에 해당하는 에너지 손실을 초래하게 된다. 그래서 두 익렬간의 상호간섭에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다.([1]~[7])

본 연구에서는 이런 손실을 발생시키는 부분에 대해서 동익과 정익 사이의 간격변화에 따른 유동장의 변화를 봄으로써 어떠한 차이가 있는지를 고찰하려는 것이다

본 연구는 실험적 방법으로 45° 단일 경사열선과 소형 kiel총압관을 사용하여, 동익과 정익의 간격을 익현장의 25%, 55%, 145%의 3간격으로 변화시키며 허브면을 기준으로 동익 후방 3mm 지점에서 허브에서부터 틈새가 있는 케이싱까지 반경방향으로 3차원 속도장을 경사열선으로 측정하였고, 소형 총압관을 사용하여 총압을 측정하여 비교, 검토하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험용 축류송풍기

실험에서 사용된 축류 송풍기는 케이싱 내경이 504mm 이고 허브/케이싱 반경비가 0.588인 1단으로 구성되었으며, 회전익은 익현길이 60mm, 두께 10%인 NACA 65계 익형이며 익의 대표적인 단면에서의 제원은 Table2.1과 같다. 정익은 두께 10%의 NGTE 원호익이며, 그 제원은 Table2.2에 나와 있다. 실험측정시, 설계점에 대한 정의는 반경방향으로 허브로부터 60mm 떨어진 위치, 축방향으로 회전익 전연으로부터 입구쪽으로 145mm 전방의 위치에서 측정된 영각이 10.7° 를 만족하는 유량으로서, 하류쪽에 설치된 댐퍼를 조절하여 영각을 만족시켰다.

Table 2.1 Details of rotor blade element

Radius, r(m) (r/Rc)	0.148 (0.587)	0.178 (0.7)	0.207 (0.8)	0.230 (0.9)	0.252 (1.0)
Chord length, C(mm)	60	60	60	60	60
Solidity, C/pitch	1.550	1.290	1.110	1.000	0.909
Stagger angle, γ (°)	20.70	30.80	38.70	43.60	47.10
Design attack α^* (°) angle,	19.20	14.30	10.70	8.80	7.80
Design inlet flow β_1^* (°) angle,	39.90	45.10	49.40	52.40	54.90
Blade section NACA - 65	1610	1210	0910	0710	0610

Table 2.2 Details of stator blade element

Radius, r(m) (r/Rc)	0.148 (0.587)	0.178 (0.7)	0.207 (0.8)	0.230 (0.9)	0.252 (1.0)
Chord length, C(mm)	60	60	60	60	60
Solidity, C/pitch	1.485	1.235	1.062	0.955	0.872
Stagger angle, γ (°)	12.65	10.25	9.45	7.80	7.10
Design inlet flow β_1^* (°) angle,	30.70	30.80	27.20	24.70	22.80
Blade section 10 C-1	44C50	40C50	39C50	36C50	35C50

2.2 측정위치 및 측정방법

2.2.1 총압 측정

총압의 측정은 허브면을 기준으로 동익 전연의 145mm 앞쪽, 동익 후연의 3mm 뒤쪽에서 측정하였다. 총압의 측정에는 소형 Kiel 총압관과 Scanivalve Corp.사의 16ch scanivalve를 사용하여 측정하였다. 디지털 마노미터가 이용되었으며, 반경방향으로 3~5mm간격으로 이송시키면서 수행

하였다. 본 연구에서는 총압관으로부터의 압력을 scanivalve를 통하여 압력신호를 각 반경에서 5000개씩 디지털 신호로 받아서 평균한 총압을 사용하였다.

2.2.2 유동장 측정

본 실험에서는 유속 측정을 위해 직경 $5\ \mu\text{m}$, 유효길이 $1\ \text{mm}$ 및 경사각 45° 인 경사열선과 정운도형 열선 풍속계(CTA)를 사용하였고, 접선 방향의 측정위치는 측정시스템의 포터 인터럽터의 설치 위치에 의해 결정되며 측정점 사이의 간격은 0.375° 이며, 1회치되는 구간(15°)에서 40개의 데이터를 600개씩 평균하여 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 특성곡선 및 효율

실험용 축류 송풍기의 특성곡선을 알아보기 위해 유량계수에 따르는 총압상승계수로 정의하여 제시하였다. 유량계수 및 총압상승계수는 각각 다음의 식으로 정의하였으며, 특성곡선은 Fig.3.1.1에 제시하였다.

$$\phi = \frac{\overline{V}_x}{U_{ip}} \quad (1)$$

$$C_{PT} = \frac{P_{T2} - P_{T1}}{\frac{1}{2} \rho g U_{ip}^2} \quad (2)$$

효율은 다음의 식으로 정의하였으며, 효율곡선은 Fig.3.1.1에 제시하였다.

$$\eta = \frac{P_{T2} - P_{T1}}{\rho U (V_e - V_n)} \quad (3)$$

Fig.3.1.1은 25%, 55%와 145%에서 댐퍼의 위치를 바꿔가며 세가지 유량에서 효율과 압력상승을 나타내었다. Fig.3.1.1의 압력상승계수를 살펴보면 25%와 55%의 곡선이 서로 가깝게 나타나며, 145%의 특성곡선은 높게 나타나고 있는 것이 관찰 된다.

또한, Fig.3.1.1의 효율곡선을 보면 간격이 멀어짐에 따라 그 효율이 증가하는 경향을 보이며, 유량변화가 간격변화에 따른 효율의 변화에 미치는 영향을 살펴보면 고유량에서는 간격변화에 따른 효율의 변화가 저유량쪽의 간격변화에 따른 효율의 변화보다 상대적으로 크게 나타난다.

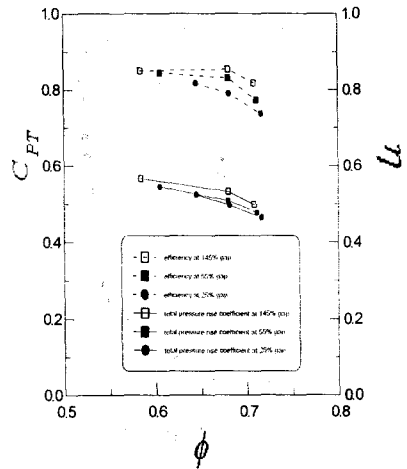


Fig.3.1.1 Axial flow fan rotor characteristic and efficiency curve

Fig.3.1.2는 입구에서의 총압분포를 나타낸다. 허브 영역에서는 허브표면의 점성경계층의 영향으로 총압이 조금 작아지며, 케이싱영역에서는 총압의 큰 '음'의 값을 나타내며, 25%일 때 케이싱 영역의 총압의 감소가 두드러진다.

Fig.3.1.3은 동익 후방에서의 총압분포를 나타내며, 간격이 멀어짐에 따라 총압이 커지며 분포의 양상은 스펠중앙부에서는 비슷하나 허브와 케이싱영역에서는 간격변화에 따른 총압의 차이가 스펠중앙부보다 크게 나타난다.

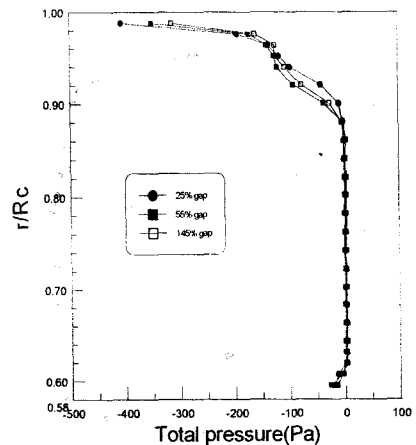


Fig.3.1.2 Distributions of total pressure at inlet

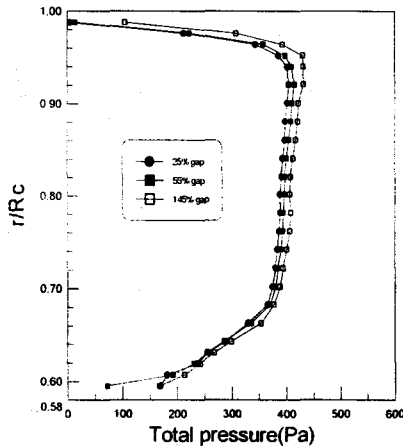


Fig.3.1.3 Distributions of total pressure downstream of rotor

3.2 간격변화에 따른 후방 유동장

3.2.1 간격변화에 따른 축방향 속도 분포

간격이 증가함에 따라 허브영역에서는 축방향 속도 분포가 변한다. 허브영역에서 145%의 축방향 분포는 실험을 수행한 세경우의 유량에서 모두가 잘 크게 나타난다. 스펀 중앙영역에서의 축방향 속도는 반경방향의 위치가 변하여도 속도의 분포에 큰 차이를 보이지 않으며, 간격변화에 따른 차이도 크지 않다. 케이싱영역에서는 간격변화에

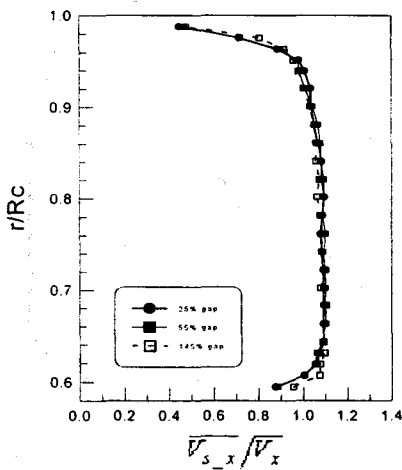


Fig.3.2.1 Distributions of axial velocity downstream of rotor

다른 영향이 Fig.3.2.1에서는 크지 않으나 저유량쪽의 축방향 속도분포에서는 차이가 나타난다.

3.2.2 간격변화에 따른 3차원 속도분포

허브영역의 축방향 속도를 나타낸 Fig.3.2.2를 보면, 허브면에서 발달한 점성경계층의 영향으로 스펀중앙부에 비하여 후류의 깊이와 폭이 증가하며, 허브와 날개면에서 발달하는 말발굽와류의 영향으로 부압면쪽에 축방향속도가 마치 후류처럼 작아지는 속도분포가 나타난다. 허브영역에서는 간격이 증가할 수록 후류의 깊이가 깊어지고, 폭에도 변화가 나타나는데, 이는 간격이 멀어질수록 후방에 위치한 정익의 포텐셜 간섭이 줄어들어 후류의 혼합이 느려지고 있는 것으로 보인다. 말발굽와류중심의 위치도 이동하여 145%일 때 날개의 압력면에서 가장 멀리 나타나고 있는데 이는 간격변화가 상대접선속도에서 변화를 가져와 부압면쪽의 말발굽와류 중심의 위치에도 변화가 나타난 것으로 보인다. 이와 같은 간격변화에 따른 후류의 형태 및 크기와 말발굽와류중심의 위치는 설계유량을 벗어난 저유량쪽에서도 같은 경향을 보인다.

스팬 중앙부에서의 속도분포는 간격변화에 따른 차이가 거의 나타나지 않는다.

케이싱영역에서 축방향속도분포를 나타낸 Fig.3.2.3은 간격변화에 따라 케이싱 가까이에서의 축방향속도분포에 차이가 있는 것을 보인다.

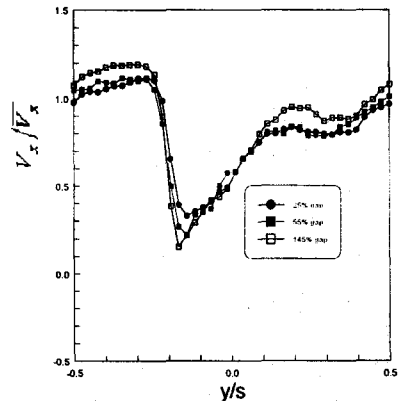


Fig.3.2.2 Distributions of axial velocity for various rotor-stator gap near a hub

익말단 부근에서 후류의 변화경향은 누설유동 및 2차유동과 관련지어질 수 있다. 즉, 간격변화

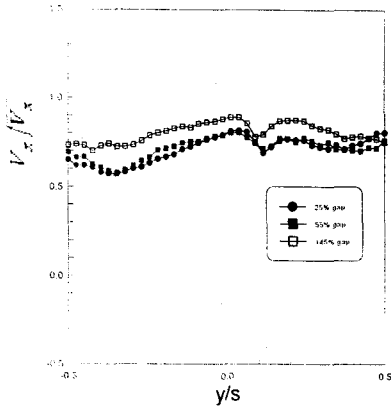


Fig.3.2.3 Distributions of axial velocity for various rotor-stator gap near a tip

에 따라 상대접선속도의 축방향속도에 대한 크기가 달라지므로 누설유동이 시작되는 날개의 위치가 달라진다.

3.3 유량변화에 따른 간격변화의 영향

145%,25% 간격에서 허브영역의 유량변화에 따른 축방향속도분포를 나타낸 Fig.3.3.1과 Fig.3.3.2를 보면, 간격변화에 따른 영향은 저유량쪽에서 좀더 크게 나타나고 있으며, 145%,25% 간격에서 케이싱 영역의 유량변화에 따른 축방향속도분포를 나타낸 Fig.3.3.3과 Fig.3.3.4를 보면, 저유량쪽의 누설유동으로 인한 부압면쪽의 위로 불룩한 축방향 속도분포가 25% 간격에서 보다 크게 나타나는 것으로 보아 유량변화에 따른 허브영역과 케이싱 영역에서의 영향이 간격이 작을 수록 더 크게 나타나는 것으로 보인다.

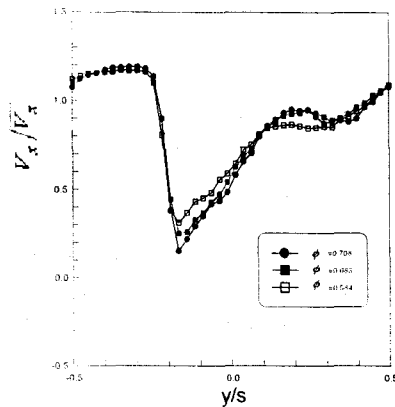


Fig.3.3.1 Axial velocity for various flowrate at 145% gap near hub downstream of rotor

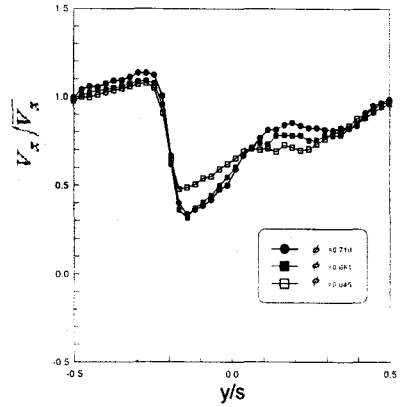


Fig.3.3.2 Axial velocity for various flowrate at 25% gap near hub downstream of rotor

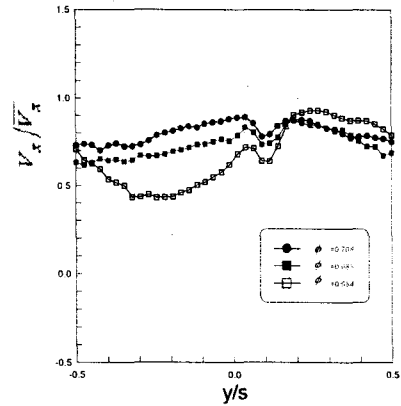


Fig.3.3.3 Axial velocity for various flowrate at 145% gap near case downstream of rotor

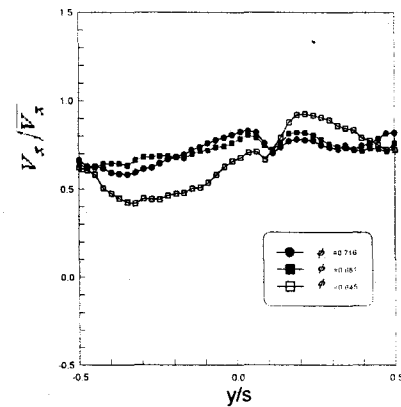


Fig.3.3.4 Axial velocity for various flowrate at 145% gap near case downstream of rotor

4. 결론

본 연구에서는 회전 익렬과 정지 익렬 사이의 간섭의 영향을 보기 위하여 연구용 축류 송풍기에 대하여 실험을 수행하였다. 회전 익렬과 정지 익렬 사이의 축방향 간격을 익현장의 25%, 55%, 145%인 경우에 대하여 송풍기의 성능과 회전익렬 후방의 유동장을 측정하여 그 결과를 비교, 평가하였으며, 이를 통하여 회전 익렬과 정지 익렬 사이의 상호 작용을 연구하였고, 그 결과는 다음과 같다.

1. 효율곡선에서 간격이 멀어짐에 따라 그 효율이 증가하는 경향을 보이며, 유량변화가 간격 변화에 따른 효율의 변화에 미치는 영향을 살펴보면 고유량에서는 간격변화에 따른 효율의 변화가 저유량쪽의 간격변화에 따른 효율의 변화보다 상대적으로 크게 나타난다. 이런 현상은 동익과 정익의 간격을 줄이면 하류에 위치한 정익의 포텐셜간섭으로 인해 효율이 저하되는 것을 나타낸다.

또한 특성곡선을 살펴보면 25%와 55%의 특성곡선이 일치하는데 145%의 특성곡선은 더 높게 나타나고 있는 것이 관찰된다.

2. 허브영역에서 동익과 정익사이의 간격이 증가할 수록 후류의 깊이와 폭이 증가하는데, 이것은 간격이 작아질 수록 후방유동장의 포텐셜간섭의 영향이 커져 후류의 혼합이 빨리 일어나는 것으로 보인다. 또한, 간격의 변화에 따라 축방향속도에 대한 상대접선속도의 크기가 변하여 부압면쪽의 말발굽와류 중심의 위치가 변하며, 145%간격에서는 말발굽와류 중심의 위치가 날개 표면에서 가장 멀리 나타나고 있다.

3. 스팬중앙영역에서는 간격이 변해도 유동장의 구조에 별다른 변화가 없었다.

4. 케이싱영역에서 포텐셜간섭은 누설와류의 형태에도 영향을 미친다.

5. 허브영역과 케이싱영역의 간격변화에 따른 영향은 고유량보다 저유량쪽에서 좀더 크게 나타난다.

6. 회전 익렬과 정지 익렬의 상호 간섭은 두 익렬 사이 뿐만 아니라 축류 송풍기 유동장 전체에 영향을 미쳤으며, 특히 회전 익렬의 후방에서는

후류의 크기나 형태 그리고, 말발굽와류 및 누설와류의 크기와 위치등에 영향을 미쳤다. 또 접선속도를 변화시켜 익 부하에도 영향을 미치는 것으로 나타났다.

후기

본연구는 한국학술진흥재단 98 과학기술 기초중점연구 기계공학분야 과제(과제번호 1998 - 018 - E00037) 로 수행되었으며, 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] H.D.Schulz, H.E.Gallus, B.Lakshminarayana : "Three-dimensional separated flow field in the endwall region of annular compressor cascade in the presence of rotor-stator interaction : part2-unsteady flow and pressure field", Journal of Turbomachinery, Vol.112, 1990.
- [2] F.J.Kelecyc, J.W.Griffin, R.A.Delaney : "The Effect of Vane - Blade Spacing on Transonic Turbine Stage Performance", AGARD PEP 85th Symposium, 1995
- [3] R.E.Walraevens, H.E.Gallus : "Stator-Rotor-Stator Interaction in an Axial Flow Turbine and its Influence on Loss Mechanisms", AGARD PEP 85th Symposium, 1995
- [4] R.C.Stauter, R.P.Dring, F.O.Carta : "Temporally and Spatially Resolved Flow in a Two-Stage Axial Compressor : Part 1 - Experiment", Journal of Turbomachinery, Vol.113, 1991
- [5] J.Prato, B.Lakshminarayana : "Investigation of compressor rotor wake structure at peak pressure rise coefficient and effect of loading", Journal of Turbomachinery, Vol.115, 1993.
- [6] D.J.Dorney, O.P.Sharma : "Evaluation of Flow Field Approximations for Transonic Compressor Stages", Journal of Turbomachinery, Vol.119, 1997
- [7] 노수혁 : "축류압축기 회전익 말단 틈새에서의 누설유동에 관한 연구", 연세대학교 기계공학과 박사학위 논문, 1999