

축류형 송풍기의 익단간극이 성능에 미치는 영향에 관한 연구

조종현* · 정양범** · 김영철*** · 조수용****†

A Study of the Tip Clearance Effect to the Performance of an Axial-Type Fan

Chong-Hyun Cho*, Yang-Beom Jung**, Young-Cheol Kim*** and Soo-Yong Cho****†

Key Words : Axial-Type Fan(축류형송풍기), Tip Clearance(익단간극), Fan Performance(송풍기성능), Performance Prediction(성능예측), Performance Test(성능시험)

ABSTRACT

Fan performances are obtained with various tip clearance gaps and stagger angles of the rotor. A tested fan is an axial-type fan of which the casing diameter is 806 mm. Two different rotors are applied to this test. One is designed on the basis of the free vortex method along the radial direction and the other is designed using the forced vortex method. The operating conditions are varied to the ultimate off-design point as well as the design point. Overall efficiency, total pressure and input power are compared with the tip clearance gaps and different stagger angle. The experimental results show that changing of the stagger angle has minor influence to the performance when the same rotor is applied. When the tip clearance gap is less than 5% of the rotor span, the overall efficiency, total pressure loss and input power reduction are varied linearly with the variation of the tip clearance gaps. On the design point, the overall efficiency is decreased to the rate of 2.8-2.9 to the increasing of the tip clearance, but the changing rate of the overall efficiency is alleviated when the fan operates at off-design points. In particular, this rate is more quickly declined on a fan with the rotor designed using the forced vortex method. The result of the total pressure shows that the pressure reduction rate is a 0.08-0.1 according to the tip clearance, and additionally the input power reduction rate is a 0.045-0.065 at design point.

1. 서론

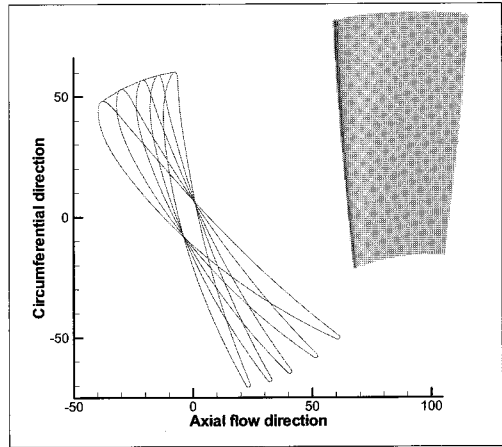
* 경상대학교 대학원
** 세보금속주식회사 기술연구소
*** 한국기계연구원 회전체기계연구팀
**** 경상대학교 항공기부품기술연구센터(기계항공공학부)
† 교신저자, E-mail : sycho@gnu.kr

송풍기가 사용되어지는 분야는 일반 산업기계, 조선, 공조분야 등 열거할 수 없을 정도로 많으며 또한 적용 분야에 따라서 다양한 형태의 송풍기가 사용되고 있다. 축류형 송풍기의 경우는 일반적으로 많은 풍량을 필요

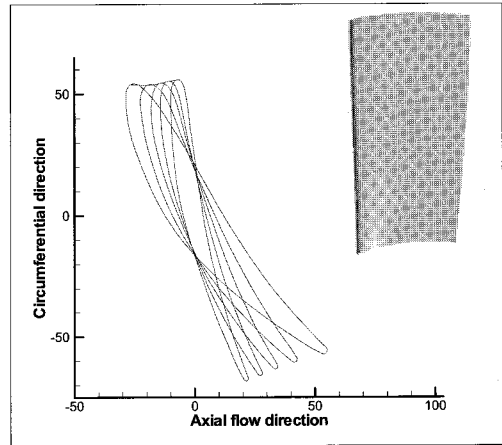
로 하는 곳에 사용되어지나 필요에 따라서, 아주 소형으로 전자제품의 냉각을 위한 장치로도 적용되어지고 있다. 이와 같은 다양한 용도로 인하여 축류형 송풍기의 설계기술은 1940-50년대에 이미 설계이론이 체계화⁽¹⁻⁵⁾되었으며, 그 동안 많은 실험으로부터 설계변수가 성능에 미치는 영향이 발표되어졌으며, 이러한 실험의 결과로부터 설계변수가 성능에 미치는 영향에 관한 다양한 모델들이 개발되어졌었다⁽⁶⁻⁷⁾. 특히 익단간극은 송풍기의 성능에 미치는 영향이 익단간극의 증가에 따라서 50% 이상으로도 영향을 미치므로, 익형 형상과 유로 내에서 형성되는 이차유동과 함께 성능에 영향을 주는 중요한 설계변수로 취급되어왔다.

상기와 같이 익단간극은 송풍기 성능에 큰 영향을 갖는 설계변수이므로 익단간극에 따른 누설유동과 주유동과의 혼합에 따른 유동장의 특성을 파악하기 위하여 수치해석적⁽⁸⁻¹⁰⁾으로나 실험적⁽¹¹⁻¹³⁾으로 상당히 많은 연구의 결과를 확인할 수 있으나, 국내외적으로 수행된 최근의 몇 가지 연구만 참고문헌으로 소개하였다. 따라서 다양한 연구 결과를 바탕으로 익단간극과 관련한 여러 설계변수에 대하여 보다 정확히 성능에 대한 영향성이 파악되어지고 있다. 그러므로 익단간극에 따른 누설와류의 모델을 바탕으로 주유동과의 혼합에 따른 효율저하에 대한 초기모델⁽¹⁴⁾보다는 여러 설계변수의 영향성을 고려할 수 있게 되었다. 하지만 이러한 연구의 대부분이 고속회전하면서 고압을 얻기 위한 압축기를 기준으로 개발되어졌으며 이를 산업용 송풍기에 적용하는 경우에 정확도가 떨어지는 성능예측을 하게 된다. 송풍기의 경우는 압축기에 비하여 낮은 현절비(코드/피치)와 낮은 익형 형상비(익형높이/코드)를 갖기 때문이다.

최근 최적화기법에 의한 산업용 송풍기의 개발⁽¹⁵⁾을 수행하면서 다른 송풍기와의 실험을 통한 성능비교를 수행하였는데, 익단간극에 따른 효율의 변화가 기존의 예측모델^(4,16)을 적용한 결과와 실험을 통하여 얻어진 결과와 차이가 발생되어졌었다. 따라서 본 연구에서는 일반적으로 반경방향에 대하여 와류를 적용하여 설계되어지는 지속회전하는 송풍기에서 익단간극의 변화에 대한 송풍기의 성능 변화를 실험적으로 확인하고, 익단간극의 변화가 성능에 미치는 영향에 대하여 올바른 관계를 얻고자 한다. Bleier⁽⁶⁾는 737mm 축류형 송풍기에서 익단간극을 1.6mm에서 25.4mm까지 9단계로 변경하면서 송풍기의 성능을 측정하였다. 측정 결과 익단간극이 증가하여도 유량의 변화폭과 소요동력의 변



(a) A-rotor designed using the free vortex



(b) B-rotor designed using the forced vortex

Fig. 1 Blade profiles along the radial direction and three-dimensional rotor blade profile

화는 그다지 크지 않았으나, 출구압력과 효율은 익단간극이 증가함에 따라 점진적인 감소를 보였다. 특히 공력효율(전동기의 손실을 고려하지 않은 효율)은 익단간극이 1.6mm일 때에 비하여 25.4mm로 증가하였을 때 14%나 감소함을 보였다. 하지만 송풍기의 형상 및 치수에 관한 데이터 충분치 못하여 실험의 결과를 실제 송풍기의 개발에 적용하기에는 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 조건 및 공조분야에서 많이 사용되어지고 있는 케이싱 직경이 806mm인 송풍기에서 익단간극을 변경하면서 송풍기의 성능을 측정하고, 익단간극이 송풍기의 성능에 미치는 영향을 제시하여 실제 송풍기의 개발이나 적용에 활용 가능한 결과를 제시하고자 한다.

Table 1 Basic configuration of tested fans

Contents	Specification	Remarks
Fan speed	1750 RPM	
Air flow	450 m ³ /min	design point
Total pressure	670 Pa	design point
Static pressure	560 Pa	design point
Number of rotor	8	
Hub diameter	355 mm	
Number of rotor	8	
Number of stator	7	
Stator chord	70 %	chord at mean
Stator exit angle	0 degree	axial direction
Stator thickness	5.0 mm	steel plate

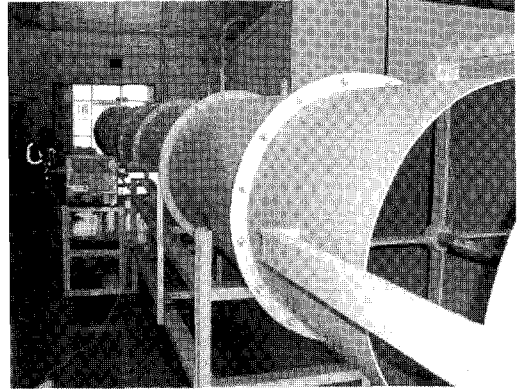


Fig. 2 Picture of experimental apparatus

2. 익형형상 및 실험장치

일반적으로 송풍기를 설계하는 방법으로는 익형의 반경방향으로 와류형식을 고려한 설계기법⁽¹⁷⁾이 사용되어지며, 고효율이 얻어지는 자유와류방식이 가장 많이 사용되나 탈설계점 운전을 고려한 강제와류방식도 일부 적용되어진다. 본 연구에서는 자유와류방식을 기본으로 설계한 익형(A-type)과 강제와류방식에 의하여 설계한 익형(B-type)의 두 종류에 대하여 실험을 수행하였으며, 반경방향으로 본 익형의 형상을 Fig. 1에서 보여주고 있다. 그림의 내부에 있는 3차원 형상은 축방향에서 본 동익의 형상을 나타낸다. 실험에 적용된 송풍기의 기본구조는 동익 후단에 정익을 갖는 형태이며 송풍기의 기본사양과 치수는 Table 1에 나타나 있다.

익단간극을 변경하면서 송풍기의 성능을 측정하는 실험에서는 익단간극의 치수가 중요한 변수이므로 이 치수의 정확도를 향상하기 위하여 익단간극의 조절을 위한 특수장치를 제작하였다. 본 장치에서는 회전축에 동익의 허브가 송풍기의 축에 조립되는 방식과 동일한 방식으로 조립되도록 하여 동심도의 변화가 없도록 하였으며, 동익의 익단을 가공하는 연마기를 원주방향에 설치하여 익단의 정밀한 가공이 이루어지도록 하였다. 익단간극 가공 시에는 동익을 허브에 조립한 후 특수장치에서 익단의 절삭을 수행한 후 그 상태를 유지한 채로 동익의 허브를 전동기 축에 조립하여 성능시험을 수행하였다. 전동기는 H SX1404221 모델로써 정격출력이 7.5kW이며, 정격회전수 1,740RPM이다. 성능시험은 KS규격⁽¹⁸⁾에 의거하여 수행하였으며, 덕트는 송출덕트로 구성하여 측정하였다. 측정단면에서의 압력은 united sensor의 피토티 튜브를 사용하였으며, 동시에 각 위

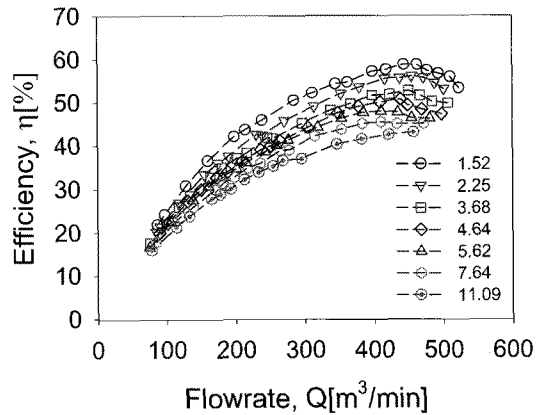


Fig. 3 Comparison of overall efficiencies with various tip clearance gaps on the A-type rotor

치에서의 압력을 측정하기 위하여 측정정확도가 full scale에서 $\pm 0.15\%$ 이내인 PSI의 Netscanner 장치를 사용하여 측정하였다. 모터의 동력은 동익과 모터 사이에 토오크미터 설치의 어려움으로 인하여 측정정밀도가 $\pm 0.1\%$ 이내인 요코가와와 WT1600 동력측정계를 사용하였으며 측정의 95% 불확도는 설계점에서의 효율에 대하여 $\pm 1.5\%$ 를 나타내었다. Fig. 2는 본 실험에 사용된 측정장치를 보여주고 있다.

3. 실험결과

3.1 효율변화

자유와류 방식을 기본으로 설계되어진 송풍기(A-type)

에서 익단간극의 변화에 따라 얻어진 효율의 변화를 Fig. 3에서 보여주고 있다. 익단간극의 비는 동익의 높이(H: 동익익단반경-허브반경)를 기준으로 익단간극(t)에 대한 비로 나타내었으며, Fig. 3에서의 익단간극의 비는 백분위로 주어졌다. 통상 산업용으로 적용하는 송풍기에서는 익단간극을 5% 이내로 사용하지만 본 실험에서는 그 이상의 영역에서도 성능의 변화를 확인하기 위하여 11%까지 변화를 주면서 측정하였다. 측정된 효율은 식(1)과 같은 총효율(overall efficiency)으로서 송풍기를 작동하는 전동기에서의 손실과 회전체를 작동하기 위한 보조장치인 베어링에서의 손실 등을 포함하는 효율이다. 따라서 전동기로 들어가는 소요동력을 기준으로 얻어진 효율이며, 송풍기의 출력동력은 송풍기의 정익을 지난 위치(식에서 하첨자 2로 정의)에서의 동력을 기준으로 삼았다. 참고로 송풍기 입구의 위치는 하첨자 1로 정의하며, 실험장치에서 송풍압력을 측정할 위치는 하첨자 3으로 정의하였다. 정익을 지난 위치(2)에서의 출력동력을 얻기 위하여서는 실험장치의 덕트내에서의 손실(위치2에서 위치3까지의 손실)을 압력보상규격⁽¹⁸⁾에 의거하여 계산하였으며 이 손실은 설계점에서 출력동력에 미치는 영향이 7% 수준이었다.

$$\eta = \eta_{aero} \times \eta_{mech} = \frac{P_{t2} \dot{Q}}{J(kW)} \quad (1)$$

Fig. 3에서 익단간극에 따라 효율은 상당히 점진적으로 감소함을 보여주고 있으며 탈설계 영역에서도 이러한 점진적인 감소의 현상은 변하지 않음을 알 수 있다. Fig. 3의 실험에서 설계점 유량은 450m³/min이었으며 설계점을 벗어난 탈설계 영역에서는 효율의 감소가 동반될 뿐만 아니라 익단간극에 따른 효율의 감소 폭은 줄어들고 있음을 알 수 있다.

산업용으로 사용하는 송풍기는 요구되어지는 모든 조건에 따라 설계와 제작을 하지 않고 몇 가지의 모델을 기준으로 유량과 압력을 조정한다. 이를 위하여 동익의 높이를 다르게 하여 장착하기도하고, 동익의 장착각도(스태거각)를 다르게 하여 조정한다. 이 경우에 효율은 설계점에서의 효율보다는 감소하게 되지만 제작의 단순화와 비용절감의 장점이 있다. Fig. 4에서 처럼 동익의 장착각도를 원래 설계각도에서 동익의 조립축을 기준으로 시계방향으로 회전한 후 조립을 하면 입구에서의 익형각(β_{in})은 증대하지만 출력압력과 유량

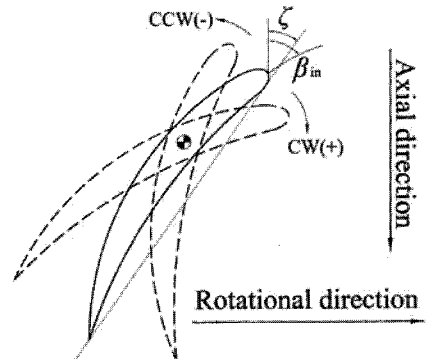
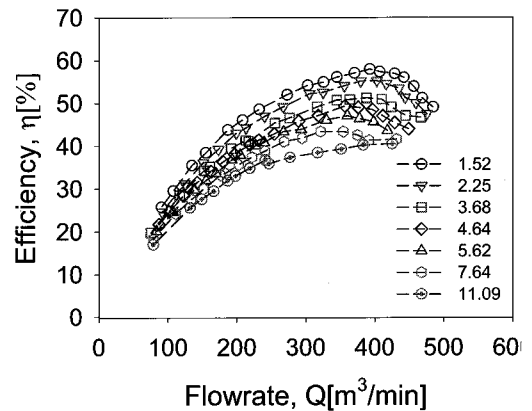
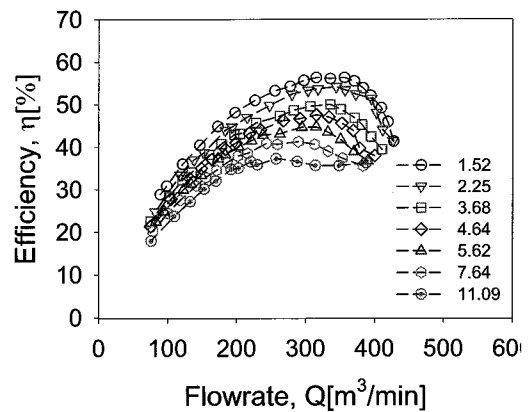


Fig. 4 Blade shapes when the stagger angle is changed



(a) $\zeta=65.7^\circ$



(b) $\zeta=68.5^\circ$

Fig. 5 Comparison of overall efficiencies with various tip clearances when the rotor installed with different stagger angle on the A-type rotor

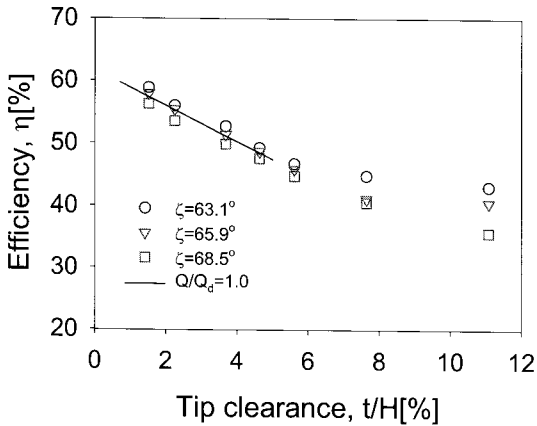


Fig. 6 Variation of overall efficiencies with tip clearance gaps and stagger angles on the A-type rotor

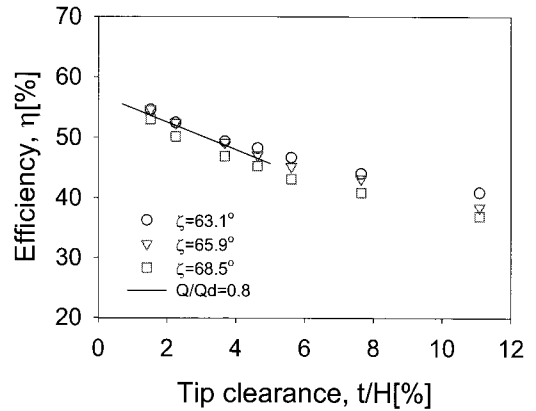


Fig. 7 Variation of overall efficiencies with tip clearance gaps and stagger angles on the A-type rotor when the flowrate is 80%

이 감소하게 되고, 반대로 반시계방향으로 회전하여 조립하면 출력압력과 유량은 증대하게 된다. 따라서 본 실험에서는 동익의 장착각도를 변경하여 효율의 변화를 측정된 결과를 Fig. 5에서 보여주고 있다. 자유와류로 설계된 동익(A-type)의 평균반경에서 스테저각(ζ)이 63.1° 이나 Fig. 5(a)와 (b)에서는 시계방향으로 2.8° ($\zeta=65.7^\circ$)와 5.4° ($\zeta=68.5^\circ$)만큼 회전하여 조립된 경우에 얻어진 결과를 보여주고 있다. 설계 장착각도 ($\zeta=63.1^\circ$)에서 얻어진 Fig. 3의 결과에 비하여 효율과 유량의 감소를 확인할 수 있으며 익단간극의 변화에 대한 효율의 변화는 동일한 경향을 보여주고 있다.

익단간극의 변화에 대하여 효율의 변화를 Fig. 6에서 보여주고 있다. 동일한 익형에서 스테저각을 변경하여도 익단간극에 따른 효율의 변화는 동일한 경향을 보여주고 있다. 이것은 성능에 작용하는 다른 설계변수보다도 익단간극의 영향이 크다는 것을 의미한다. 스테저각을 바꾸어서 성능시험을 수행하였을 때 설계 유량(Q_d)은 최고 효율점에서의 유량으로 설정하였다. 산업용 송풍기는 익단간극이 5% 미만에서 조정되므로, 익단간극이 5% 미만인 영역에서 효율의 변화에 대한 경향을 보면 직선적으로 변화하고 있음을 알 수 있다. 따라서 익단간극에 대하여 효율의 감소를 식(2)와 같이 직선적으로 표현하면, 익단간극에 대한 효율변화율(C :식(2)의 계수)을 얻게 된다. Fig. 6의 결과에서는 효율변화율이 고속회전하는 압축기의 실험으로부터 얻어진 2.0의 값^(4,16)보다는 익단간극의 증가에 대하여 효율의 감소가 크게 발생되어지고 있음을 알 수 있으며, 자유와류 방식으로 설계된(A-type) 로터에서는 2.87의

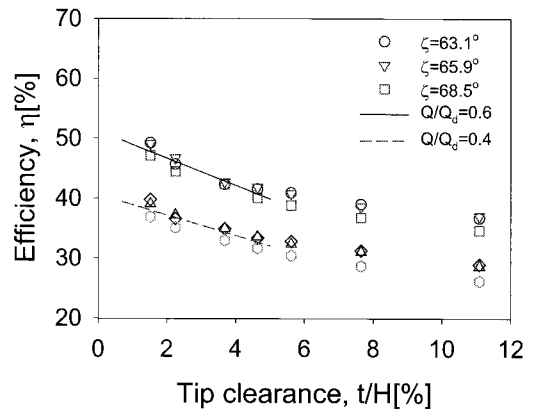


Fig. 8 Variation of overall efficiencies with tip clearance gaps and stagger angles on the A-type rotor when the flowrates are 60% and 40%

변화율을 얻었다. 본 실험과 비슷한 크기(29인치)와 동일한 회전수에서 실험⁽⁶⁾한 결과에서는 동익의 높이를 알 수 없으나 일반적으로 산업용 송풍기에서 동익의 높이가 케이싱 직경의 28% 정도 되므로, 이를 적용하여 얻어진 동익의 높이를 기준으로 얻어진 익단간극에 대한 효율변화율은 2.77의 값이 얻어진다. 따라서 압축기와 달리 저속 회전하는 송풍기에서는 익단간극의 영향이 크다는 것을 알 수 있다. 그리고 익단간극이 5% 이상에서는 점차적으로 효율의 감소가 완화되어 어느 효율점으로 접근하게 됨을 알 수 있다. 이는 케이싱 없이 작동하게 되는 경우와 동일한 결과가 되고 있음을 나타내는 것이다.

$$\Delta\eta(\%) = -C \times (t/H)(\%) \quad (2)$$

Fig. 7은 설계점에서 유량보다도 20% 적은 탈설계점에서 작동하는 경우에 익단간극에 따른 효율의 변화를 보여주고 있다. Fig. 6의 경우와 마찬가지로 스테저각의 변화에도 동일한 변화를 보여주고 있으며, 단지 탈설계 영역에서 작동하므로 효율의 절대값이 감소하였음을 보여주고 있다. 익단간극이 5% 미만의 영역에서 효율은 익단간극의 증가에 따라서 직선적으로 감소하나 설계점에서 얻어진 결과와 달리 효율의 감소폭은 다소 줄어든 경향을 나타내며, 효율의 변화율(C)은 2.29를 얻었다.

동일한 방법으로 유량이 설계유량의 60%와 40%에

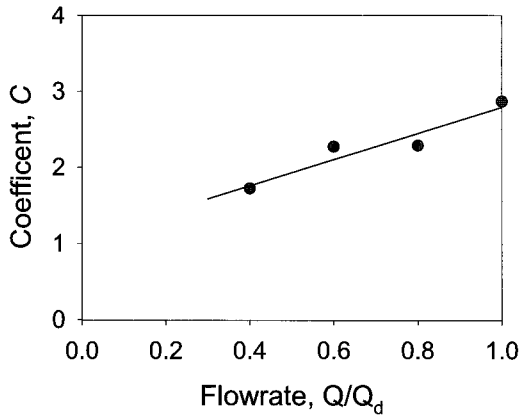


Fig. 9 Variation of coefficient on the efficiency rate which show the overall efficiency reduction with increasing tip clearance gaps

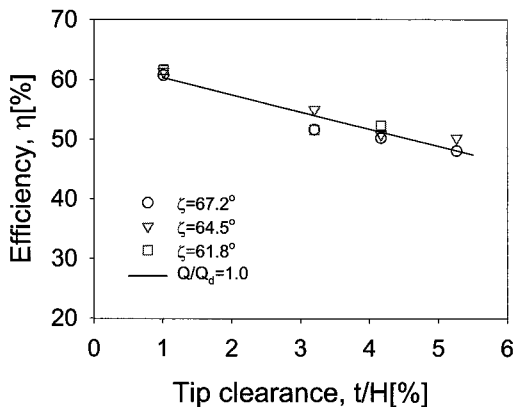


Fig. 10 Variation of overall efficiencies with tip clearance gaps and stagger angles on the B-type rotor

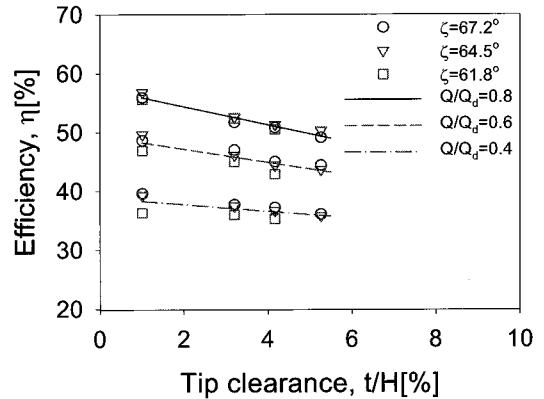


Fig. 11 Variation of overall efficiencies with tip clearance gaps and stagger angles on the B-type rotor when the flowrates are 80%, 60% and 40%

서 작동하는 경우에 효율의 변화율은 익단각극에 대하여 2.27와 1.72의 변화를 보여주고 있음을 Fig. 8에서 보여주고 있다. 효율의 변화율은 탈설계 영역에서는 작동유량이 적은 영역에서 작동하는 경우에는 줄어드는 특성을 보였다. 따라서 이를 유량비에 대한 변화를 Fig. 9에서 보여주는데, 효율저하에 대한 변화율은 유량의 변화에 따라 1.72의 변화를 나타내고 있다.

동익의 형상을 강제와류의 방식(B-type)으로 설계한 익형으로 작동하는 경우의 익단간극의 변화에 대한 효율의 변화를 Fig. 10에서 보여주고 있다. 이 경우에도 동일한 익형에서 스테저각을 변경하여도 효율의 변화에 대한 경향성은 동일한 결과를 보여주며, 익단간극이 5% 미만인 영역에서 효율은 익단간극의 증가에 따라 직선적으로 변하고 있음을 보여주고 있다. 설계유량에서 작동하는 경우에 익단간극의 증가에 따른 효율의 변화율은 2.89를 얻었으며 A-type 익형의 송풍기 결과와 상당히 비슷한 결과를 얻었다. 마찬가지로 압축기의 결과로부터 얻어진 효율변화율 2.0보다는 큰 값을 가지므로, 저속회전하는 송풍기에서는 익단간극에 대한 영향이 더 크게 나타남을 알 수 있다.

탈설계 유량에서 작동하는 경우에 B-type 동익에서의 익단간극에 대한 영향을 Fig. 11에서 보여주고 있다. A-type의 익형에서 얻어진 탈설계 작동과 비슷한 경향을 보여주고 있으나 설계점 유량에서 멀어질수록 익단간극에 대한 효율변화율은 감소하는 경향이 크게 나타나는 특징을 보여준다. B-type의 동익에서는 탈설계 유량이 80%, 60% 그리고 40% 인 경우에는 효율감소계수가 1.54, 1.24, 0.57의 변화를 보였다. 이러한 결

과를 Fig. 9와 같이 작동유량에 대한 효율변화율의 변화비는 2.98로 A-type의 1.72의 변화비보다는 크게 나타남으로 강제와류로 설계되는 동익의 경우에는 익단간극에 대한 효율변화율이 작동유량이 설계점에서 멀어질수록 줄어드는 특징을 보여주었다. 이는 강제와류의 형식으로 설계되어지는 익형은 반경방향에서 보았을 때 익형의 비틀림이 자유와류로 설계되어진 익형에 비하여 완화되어지는 특징을 가지고 있다. 이러한 특징으로 탈설계 작동 시 동익에 가하여지는 부하가 허브측으로 치우쳐지는 현상이 발생되어 탈설계 영역에서 작동하는 경우에 익단에서의 부하는 완화되어져 익단간극의 변화에 둔감한 현상을 보여주었다.

3.2 전압변화

앞 절에서의 효율계산은 측정위치(3)에서 얻어진 압력값을 측정장치에서 발생한 덕트손실을 보정한 후 송풍기의 정익후단(2)에서의 전압력으로 구하였으나, 손실의 보상은 적용규정이나 방법에 따라 달라질 수 있으므로 적용의 편의를 위하여, 본 절에서 전압력에 대한 결과는 측정위치에서 얻어진 결과를 나타내도록 한다. Fig. 12는 효율선도와 마찬가지로 익단간극을 변화시키면서 측정된 결과를 보여주고 있으며, 압력선도로부터 송풍기의 스톨이 발생되어지는 지점을 확인할 수 있다. 스톨이 발생되어지는 지점에서는 압력의 급격한 변화가 발생되어지고 있으며, 익단간극의 증가에 따라 스톨의 발생은 유량이 증가하는 영역에서 형성되어지는 특징을 보여주고 있다. Fig. 12에서는 장착된 동익의 스테저각이 65.9°인 경우에 대하여 보여주고 있으며, 스테저각을 변경한 경우에도 동일한 경향을 나타내었다. 송풍기의 작동영역을 변경하면서 사용하여야 하는 경우에, 통상 스톨이 발생되기 이전의 작동영역에서 사용하므로 익단간극에 대한 압력의 변화는 스톨이 발생하기 이전의 영역에서 압력변화의 경향을 나타내었다.

$$\kappa = \frac{P_{t3o} - P_{t3}}{P_{t3o}} \quad (3)$$

전압력손실(κ)의 변화를 익단간극에 대하여 Fig. 13에서 보여주고 있으며, 효율선도에서와 마찬가지로 스테저각을 변경하여 장착한 경우에도 동일한 변화를 보여주고 있음을 알 수 있다. 익단간극이 증가하게 되면

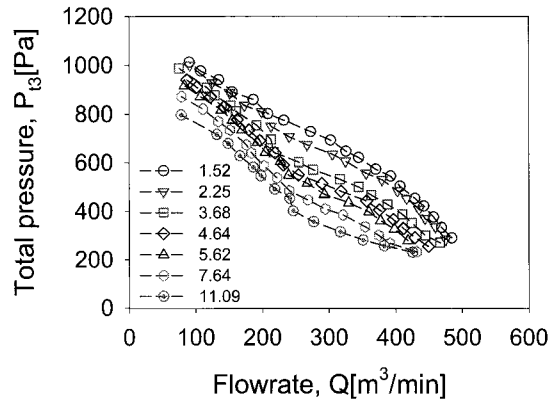


Fig. 12 Comparison of total pressure with tip clearance gaps on the A-type rotor when the stagger angle is 65.9°

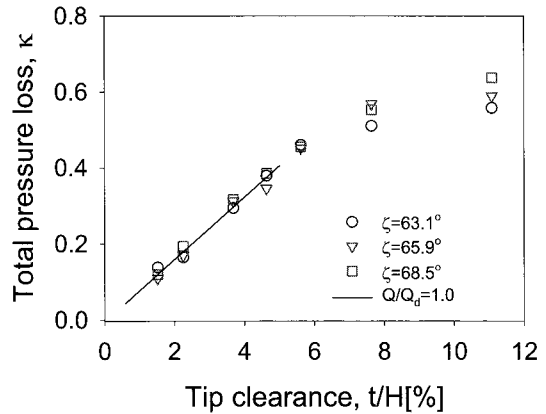


Fig. 13 Variation of total pressure loss with tip clearance gaps and stagger angles on the A-type rotor

전압력의 손실은 일정한 값에 접근하게 되는데 이는 케이싱이 없는 상태와 동일하게 됨을 나타내고 있다. 송풍기의 익단간극은 5%이내에서 조절을 하므로 이 범위에서의 전압력 손실의 경향은 직선적으로 변화됨을 알 수 있다. 전압력손실은 식(3)처럼 얻어질 수 있는데 P_{t3o} 의 값은 익단간극이 없는 경우의 값으로 환산한 것이다. 익단간극이 5%이내의 영역에서는 압력이 직선적으로 변화하므로 이를 기준으로 익단이 없을 때의 값으로부터 식(3)과 같이 전압력손실을 얻었다. Fig. 13에서의 작동은 설계점의 영역에서 작동하는 경우인데 전압력손실은 익단간극에 대하여 0.082의 변화를 보였다. 이러한 경향은 송풍기 정익후단에서의 전압력 손실변화나 측정위치에서의 정압력 손실변화도 비슷하게 나타난다.

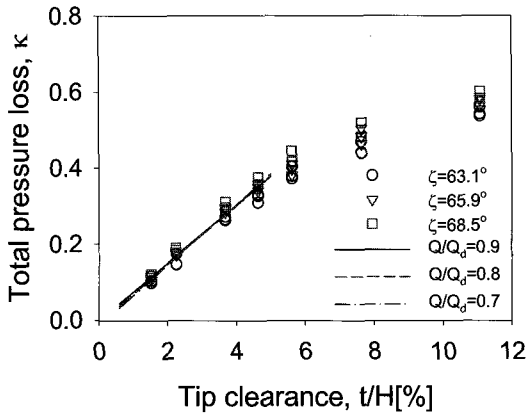
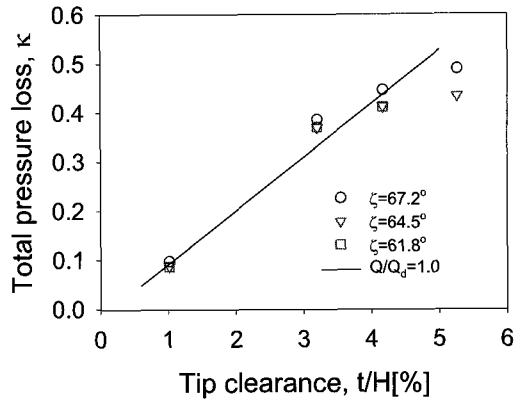


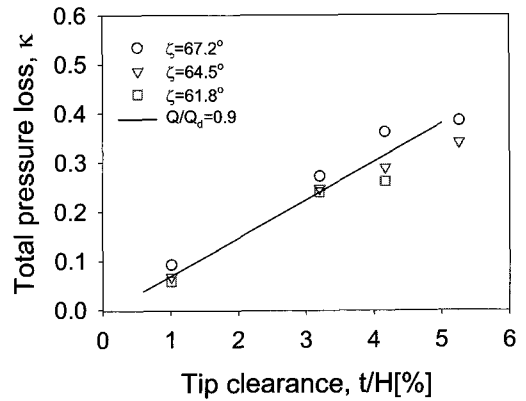
Fig. 14 Variation of total pressure loss with tip clearance gaps and stagger angles on the A-type rotor when the flowrates are 90%, 80% and 70%

탈설계 영역에서 작동하는 경우의 압력손실 변화를 Fig. 14에서 보여주고 있는데 탈설계 유량이 90-70% 까지 변하는 경우에 압력손실의 변화는 작동유량이 변하여도 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 이 영역은 스톨이 발생되기 이전의 영역으로 자유와류방식으로 설계되어진 동익에서는 압력손실이 익단간극의 증가에 대하여 익단간극이 5% 이내의 영역에서 직선적으로 증가함을 보여주고 있으며, 스톨이 발생되기 이전의 영역에서는 탈설계 영역이라도 비슷한 경향으로 전압력손실이 증가함을 보여주고 있다. 전압력손실의 변화계수는 0.076-0.082의 범위를 얻었다.

동익의 형상이 강제와류의 방식으로 설계되어진 경우에 익단간극에 대한 전압력손실을 Fig. 15에서 보여주고 있다. A-type의 동익에서와 마찬가지로 스테거각의 변화에 대하여서는 큰 차이를 보이지 않으나 탈설계점에서 작동하는 경우에는 A-type과 다르게 전압력손실의 계수가 변화되어 짐을 보여주고 있다. 설계점에서 작동하는 경우에 익단간극에 대한 전압력손실계수는 0.096이었으나 작동유량이 설계점의 90%인 경우에는 전압력손실계수가 0.074로 줄어들었다. 그리고 설계점 유량에서 80%와 70%에서 작동하는 경우를 Fig. 16에서 보여주고 있으나 이들의 전압력손실의 계수는 0.051과 0.050을 얻었다. 따라서 B-type의 익형에서는 탈설계 영역에서 작동하는 경우에 설계점 유량에서 멀어질수록 전압력의 손실계수는 줄어드는 특징을 보이다가 어느 영역 이상에서는 일정한 값을 나타내고 있음을 알 수 있다. 이는 앞서 효율에서 언급한 것처럼



(a) $Q/Q_d=1.0$



(b) $Q/Q_d=0.9$

Fig. 15 Variation of total pressure loss with tip clearance gaps and stagger angles on the B-type rotor

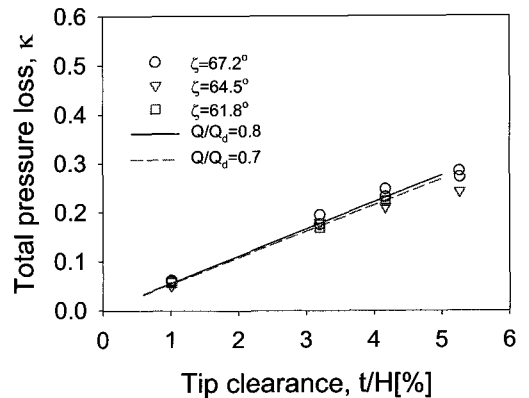


Fig. 16 Variation of total pressure loss with tip clearance gaps and stagger angles on the B-type rotor when the flowrates are 80% and 70%

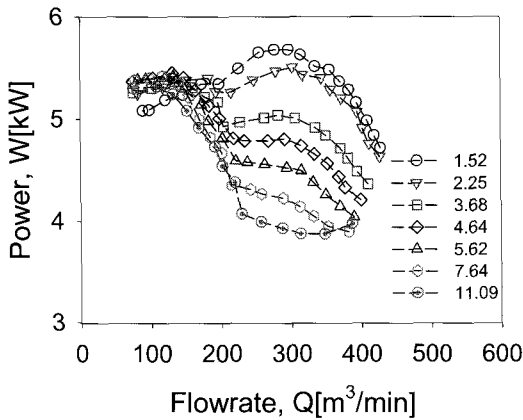
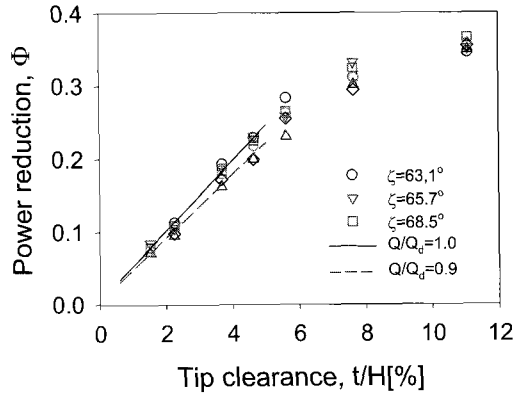


Fig. 17 Comparison of input power with tip clearance gaps on the A-type rotor when the stagger angle is 68.5°

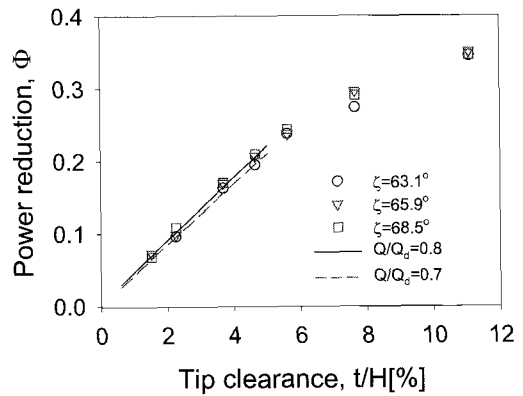
설계방식에 따라서 탈설계 영역에서 작동하는 경우 익단에서의 작동부하가 줄어들게 되면서 발생되어지는 현상과 일치함을 보여주고 있다. 효율에서와 마찬가지로 전압력의 손실계수의 변화율도 B-type의 경우는 설계점에서 탈설계 영역으로 멀어질수록 손실계수의 변화율은 둔감하여지는 특징을 보여주고 있다.

3.3 소요동력변화

소요동력은 송풍기 동익의 스테저각이나 익단간극에 의하여 변하게 된다. Fig. 17은 자유와류방식으로 설계된 동익에서 스테저각이 68.5°인 경우에 익단간극과 유량의 변화에 따른 소요동력의 변화를 보여주고 있다. 소요동력 변화에 대한 곡선으로부터 송풍기의 스톨상태를 확인 할 수 있으며 스톨이 발생하는 지점에서 소요동력의 급격한 증가가 확인되어진다. 스톨이 발생되기 이전의 영역에서 익단간극에 대한 소요동력의 변화를 Fig. 18에서 보여주고 있다. 익단간극이 5% 이상의 영역에서는 익단각이 증가하여도 어느 값으로 접근하게 됨을 보여주고 있으며, 5% 이내의 영역에서는 익단각의 변화에 대하여 소요동력의 감소는 직선적으로 변하고 있음을 알 수 있다. 소요동력감소(ϕ)는 익단간극이 없는 경우의 소요동력(W_{i0})에 대하여 익단간극에 따른 소요동력의 감소분으로 식(4)와 같이 표현된다. 익단이 없는 경우의 소요동력(W_{i0})은 익단간극이 5%이내의 영역에서는 직선적으로 변하므로 이를 이용하여 구하였다.



(a) $Q/Q_d=100\%$ and 90%



(b) $Q/Q_d=80\%$ and 70%

Fig. 18 Variation of input power reduction with tip clearance gaps and stagger angles on the A-type rotor

$$\phi = \frac{W_{i0} - W_i}{W_{i0}} \quad (4)$$

설계점 유량에서 탈설계 영역으로 멀어질수록 익단간극에 대한 소요동력 감소계수는 미미하게 완화되지만 전체적으로 자유와류방식으로 설계된 익형에서는 0.042- 0.048의 범위를 나타내었다. 동익이 강제와류방식에 의하여 설계된 경우에 익단간극과 스테저각을 변경하면서 소요동력 변화를 측정된 결과를 Fig. 19에서 보여주고 있다. 이 경우에는 A-type 송풍기에서의 결과와 비슷한 경향을 보여주지만은 설계점 유량에서 탈설계 영역으로 멀어질수록 소요동력 감소계수가 빠르게 완화되는 특징을 보여주고 있다. 이는 앞서의 효율이나 전압력 의 변화에 대한 것과 일치하는 현상으로

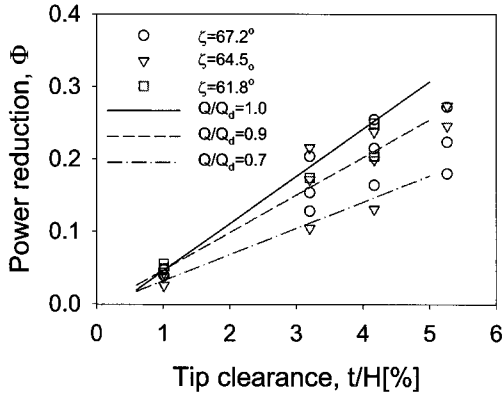


Fig. 19 Variation of input power reduction with tip clearance gaps and stagger angles on the B-type rotor

써 탈설계 영역에서 작동하게 되면 익단에서의 부하가 적어지는 특징으로 인하여 익단의 효과가 그다지 영향을 미치지 못하므로 소요동력 감소계수가 완화되어지는 것이다. 이 경우에 소요동력 감소계수의 변화는 0.036-0.065의 변화를 보여주었다.

소요동력 변화에 대한 Bleier⁽⁶⁾의 실험결과에서 앞서와 마찬가지로 유로높이의 28%를 동익의 높이로 정할 경우에 익단간극에 대한 소요동력의 변화를 설계점에서 작동하는 경우에 0.045일었다. 이 결과는 저속회전하는 송풍기에서 얻어진 실험의 결과와 상당히 잘 일치하는 결과로 판단되어지며 본 실험에서 얻어진 결과는 산업용 축류형 송풍기의 개발이나 평가에 유용하게 적용될 수 있을 것이다.

4. 결론

저압 저속도에서 사용되는 산업용 축류형 송풍기에 있어 익단간극과 동익의 장착각도를 변경하면서 설계점 영역뿐만 아니라 탈설계 영역에서의 성능을 측정하였다. 동익은 설계 시 반경방향으로 다른 와류방식으로 설계되어진 익형을 적용하여 동익의 차이에 대한 성능 변화에 대한 효과도 파악하였다.

동일한 형태의 동익으로 작동압력이나 유량을 변경하면서 익단간극의 변화에 대한 성능을 측정하는 경우에 장착각도인 스테이지각도를 61.8°에서 68.5°까지 변경하여도 장착각도의 변화는 성능변화에 큰 차이를 보이지 않았다. 효율의 경우는 설계점에서 작동하는 경우

에 익단간극의 증가에 따라 효율감소비율이 2.8-2.9의 범위에 있었으며 탈설계 영역에서 작동하는 경우에 강제와류방식에 의한 동익의 경우는 익단의 변화에 대한 효율의 변화율이 빨리 완화되어지는 특징을 보였다.

전압력의 변화는 설계점에서 익단간극에 대한 전압력 손실비는 0.08-0.1을 나타내었으며, 전동기에서의 소요동력 감소비는 0.045-0.065를 나타내었다. 효율과 마찬가지로 강제와류설계방식으로 제작된 동익에서는 전압력이나 소요동력의 변화율이 탈설계 영역으로 갈수록 빨리 완화되는 특징을 보였다.

후 기

본 연구는 본 연구는 교육과학기술부의 21세기 프론티어 연구개발사업인 이산화탄소 저감 및 처리 기술 개발 사업단의 연구비 지원(CH3-101-04)으로 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Wallis, R. A., 1961, "Axial Flow Fans," Academic Press.
- (2) Eck, B., 1973, "Fans : Design and Operation of Centrifugal, Axial-Flow and Cross-Flow Fans," Azad, R. S., Scott, D. R., Translation Pergamon.
- (3) Osborne, W. C., 1977, "Fans," 2nd edition, Pergamon Press.
- (4) Wallis, R. A., 1983, "Axial Flow Fans and Ducts," John Wiley & Sons.
- (5) Wright, T., 1996, "Low Pressure Axial Fans," Handbook of Fluid Dynamics and Fluid Machinery. 3: Application of Fluid Dynamics; Schetz, J. A. and Fuhs, A. E., Wiley.
- (6) Bleier, F. P., 1997, "Fan Handbook: Selection, Application and Design," McGraw-Hill 4.38-4.44.
- (7) McKenzie, A. B., 1997, "Axial Flow Fans and Compressor; Aerodynamic design and Performance," Ashgate.
- (8) 노수혁, 조광래, 1999, "축류 회전차 익단 틈새유동에 대한 수치해석 (III)," 대한기계학회논문집 B권, Vol. 23, No. 3 pp. 1113~1120.
- (9) 이공희, 백계현, 2003, "축류형 유체기계에서 익단 누설 유동해석을 위한 난류모델성능평가," 대한기계

- 학회논문집 B권, Vol. 27, No. 15 pp. 1655~1666.
- (10) Hah, C. and Lee, Y., 2007, "Unsteady Pressure Field Due to Interactions Among Tip Leakage Vortex, Trailing Edge Vortex, and Vortex Shedding in a Ducted Propeller," ASME paper GT2007-27407.
- (11) Kang, S. and Hirsch, C., 1993, "Experimental Study on the Three-Dimensional Flow Within a Compressor Cascade With Tip Clearance," Vol. 115, *J. of Turbomachinery*, pp. 435~452.
- (12) Jang C. M., Sato, D. and Fukano, T., 2005, "Experimental Analysis on Tip Leakage and Wake Flow in an Axial Flow Fan According to Flow Rates," Vol. 127, *J. of Fluids Engineering*, pp. 322~329.
- (13) Zhu, X., Lin, W. and Du, Z., 2005, "Experimental and Numerical Investigation of the Flow Field in the Tip Region of an Axial Ventilation Fan," Vol. 127, *J. of Fluids Engineering*, pp. 299~307.
- (14) Lakshminarayana, B., 1970, "Methods of Predicting the Tip Clearance Effects in Axial Flow Turbo-machinery," *ASME J. of Basic Engineering*, pp. 467~482.
- (15) 조봉수, 조종현, 정양범, 조수용, 2007, "최적화 기법을 이용한 축류형 송풍기개발에 관한연구," 유체기계저널 Vol. 10, No. 6, pp. 7~16.
- (16) Gosh, M. T., 2001, "*Compressor Performance; Aerodynamics for the User*," Butterworth Heinemann.
- (17) 조수용, 최범석, 오종학, 1999, "축류송풍기의 설계 시 적용된 외류형식의 영향에 관한 실험적 연구," 유체기계저널, Vol. 2, No. 3 pp. 7~16.
- (18) KS B6311, 2001, "송풍기의 시험 및 검사방법," 한국산업규격.