

산업용 조정 피치형 축류송풍기의 성능예측에 관한 연구

구재인* · 김창수*** · 정진택** · 김광호***

Study on Performance Prediction of Industrial Axial Flow Fan with Adjustable Pitch Blades

Jae-In Koo*, Chang-Soo Kim***, Jin-Teak Chung**, Kwang-Ho Kim***

Key Words : Axial Flow Fan(축류송풍기), Stagger Angle(설치각), Deviation Angle(편차각), Pressure Loss(압력손실), Performance Prediction(성능예측)

ABSTRACT

In the present study, we studied the method of predicting the on-design and off-design point performance of axial flow fan with adjustable pitch blades. With the change of stagger angle of axial flow fan with adjustable pitch blade, flow rate and pressure can be changed. Because of this merit, adjustable pitch fans are used in many industrial facility. When changing stagger angle or estimating the performance at a wide range of off-design condition, incidence angle changes greatly as the flow rate changes. Therefore, the deviation angle at the blade exit is estimated by the correlation considering the effects of blade design, incidence angle variation. In the loss model, we used known pressure loss model for blade boundary layer and wake, secondary flow, endwall boundary layer and tip leakage flow. The results of modified deviation angle model and experiment were compared for the usefulness of the modified model.

1. 서 론

실험 대상인 조정 피치 축류송풍기는 블레이드와 허브가 별도로 되어있어 블레이드를 허브에 조립 시 설치각을 임의로 조정할 수 있는 장점 때문에 운전범위를 넓게 할 수 있다. 소비자가 송풍기를 운전할 때 설계 또는 구입시 정해진 운전영역과 다른 압력, 유량에서 운전해야하는 경우가 많다. 실제로 산업현장에서는 설치각을 변화시켜 사용하는 경우가 자주 발생하고 있지만, 주로 경험에 의존하는 방법으로 많은 시간과 비용, 노력이 소모되고 있다. 현재까지 성능예측에 관

한 연구는 설계점에서 설치각 변화를 고려하지 않고, 유량변화에 대한 탈설계점 예측이 대부분 이었다.^(1,2) 따라서 설치각 변화에 따른 성능곡선을 예측하는 것은 효율적인 송풍기 운전과 에너지 절약을 위하여 반드시 필요하다.

본 연구에서는 편차각 모델과 전압력손실 모델을 결합하여 송풍기의 설치각 변화에 따른 설계점/탈설계점의 성능을 예측하였다. 편차각 모델은 블레이드의 형상과 유동입사각, 설치각을 포함할 수 있는 모델을 사용하였다. 특히, 설치각과 유량 변화로 발생하는 입사각을 고려하여, 입구유동각과 출구날개각의 차이로 정의한 수정된 캠버각(K)을 편차각 모델에 적용하였다. 송풍기내 유동의 전압력손실은 형상손실, 2차유동손실, 벽면 경계층 손실, 끝단격 손실을 사용하여 예측

* 고려대학교 대학원

** 고려대학교 기계공학과

*** 한국과학기술연구원(KIST)

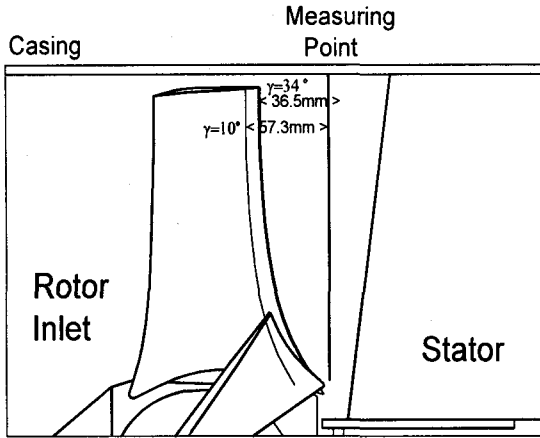


Fig. 3 Measuring plane

2.3 유동측정

회전수는 1750 rpm, 설치각도 10°, 18°, 26° 의 몇 가지 유량 조건에서 송풍기 A는 Dantec사의 45° 경사 열선을 D.P.Schmidt와 T.H.Okiishi의 방법으로 검정한 후, 회전익의 후방에서 반경방향으로 이송시키며 유동장을 측정한다. 반경방향으로는 허브와 팁에서 4 mm 간격으로 미드스팬에서는 12 mm 간격으로 이송하며 각 지점의 유동장을 측정한다. 송풍기 B는 3공 프루우브를 검정한 후 회전익 후방 허브에서 케이싱면으로 10 mm 간격으로 이송하며 측정한다. Fig. 3은 설치각도 10° 와 34°에서의 블레이드와 측정점 사이의 거리를 팁에 대해 도식한 것이다.

3. 예측방법

송풍기의 성능예측에는 유선곡률법을 비롯한 다양한 연구방법이 있는데, 본 연구에서는 속도삼각형과 편차각모델 및 손실모델을 사용한다. 송풍기의 형상이 결정된 후 설치각과 유량 변화로 인한 영향을 크게 받는 것은 편차각의 변화가 될 것이다. 입구 유동을 균일하다고 가정하고, 오일러 방정식을 이용하여 속도삼각형에서 이론 압력을 얻을 수 있다. 여기에서 설치각과 유량변화를 포함하는 편차각과 손실모델을 고려하면 송풍기의 형상만으로 성능을 예측할 수 있게 된다. 따라서 성능예측에 가장 중요한 부분은 편차각과 손실 모델의 정확성이다.

3.1 유동편차각 모델

지금까지 자주 사용되는 편차각에 대한 경험식은 Constant의 식을 수정하여 만든 Carter's rule이다. 이는 캠버각과 간격대 익현비로서 편차각을 나타내는 경험식이다.

$$\delta_{ref} = m\theta / \sigma^{0.5} \quad (1)$$

그러나 송풍기가 설계점에서 벗어난 점에서 작동하는 경우에는 유동편차각은 유동조건에 영향을 받게되고, 탈설계점 편차각은 설계점 값과 입사각의 함수로 표현할 수 있다.

$$\delta = \delta_{ref} + \frac{d\delta}{di}(i - i_{ref}) \quad (2)$$

Lieblein⁽⁴⁾은 식 (2)에서 입사각과 편차각간의 기울기를 익렬 입구 유동각과 솔리디티의 관계로 나타내었다. 그러나 이러한 경우 기준점을 사용해야 하는데, 설치각을 변화시키는 조정 피치 송풍기에서는 설치각 변화 때마다 기준점을 정해야 하는 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 설치각 변화와 유동변화를 보다 쉽게 고려하기 위하여 입구유동각과 출구날개각의 차이로 정의되는 K-angle을 사용하였다.

$$\delta = mK / \sigma^{0.5} \quad (3)$$

즉, K-angle은 입구유동각의 변화를 고려한 값으로 캠버각(θ)에 입사각(i)을 포함시킨 각이다.

3.2 전압력손실의 예측

축류송풍기에서의 전압력손실은 유체의 점성에 의한 유로 면에서의 경계층과 후류에 기인한다. 이러한 손실 메커니즘은 대부분 실험에 근거한 경험식으로 주로 사용된 익형은 NACA 65 계열 익형이다. 전압력손실은 날개 형상손실(profile loss, ω_p), 벽면손실(end wall loss, ω_e), 2차 유동손실(secondary flow loss, ω_s), 끝간격손실(tip clearance loss, ω_c)등으로 구분할 수 있다. 그러므로 날개후방의 전압력 손실계수는 모든 손실계수의 합으로 표현할 수 있다.⁽⁵⁻⁷⁾

$$\omega_T = \omega_p + \omega_e + \omega_s + \omega_c \quad (4)$$

4. 결과 및 고찰

회전의 후방의 유동측정 결과로부터 설치각 변화와 유량변화에 따른 편차각 분포를 살펴보았다. 송풍기 A에서 설치각이 동일할 때 유량이 감소함에 따라 편차각이 증가함을 볼 수 있다. 이것은 유량 감소에 따라 압력이 상승하여 블레이드의 부하가 증가하였기 때문에 설치각 26°의 경우 뚜렷이 나타나지만, 설치각이 작은 경우에는 뚜렷이 구별되지 않았다. 반경방향에 따른 편차각 분포는 미드스팬 영역에서 작은 구배를 갖는 반면 허브영역은 경계층의 영향으로 큰 구배를 갖는 경향을 보였으며, 이것은 다른 설치각의 경우에서도 동일하게 나타났다. 송풍기 B에서는 Table 1과 2에서 보는 바와 같이 송풍기 B의 캠버각이 송풍기 A보다 크기 때문에 더 큰 편차각을 예상하였으나, 설치각과 유량 변화에 대한 편차각 변화를 확인할 수는 없었다.

Fig. 4는 송풍기 A의 회전에서 입/출구 날개각과 유동각을 반경방향 따라 나타내었다. 블레이드 형상으로부터 날개각을 구하였고, 유량과 편차각 모델로부터 유동 입/출구각을 구하였다. 이때 원주방향을 기준으로, 설계시 설치각 22도에서 12도를 변화시킨 설치각 10도의 경우, 유동출구각이 유동입구각보다 큰 경우가 발생하였다. 블레이드를 통과하는 유동의 이상적인 흐름은 캠버각을 따라 흐르는 것이다. 따라서 유동 출구각이 유동입구각보다 크다는 것은 물리적으로 타당하지 못하다. 따라서 기존 편차각 모델은 설치각과 유량 범위가 크게 변화할 때 적용하기 어려운 부분이 발생

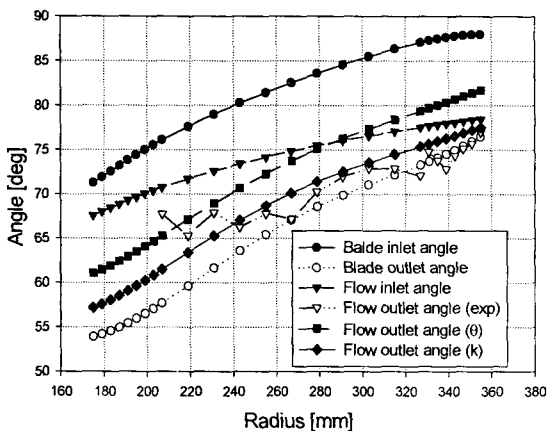


Fig. 4 Predicted and measured inlet/outlet angle distribution for a rotor A

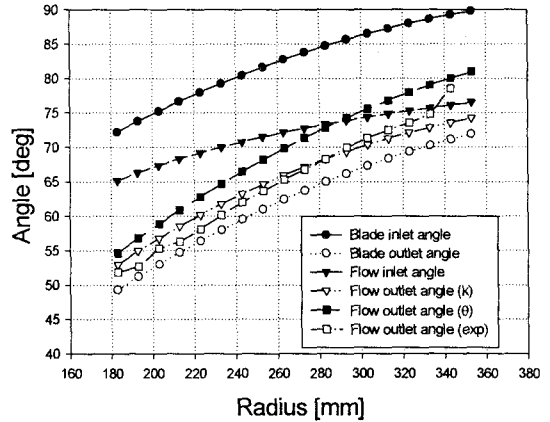


Fig. 5 Predicted and measured inlet/outlet angle distribution for a rotor B

할 수 있다.

일반적으로 송풍기 설계는 입구 유동각에 의한 손실이 최소가 되는 조건을 적용한다. 하지만 설치각을 변화시키거나 넓은 범위의 탈설계점을 실험하기 위해 유량을 변화시키면 최적 조건으로부터 입구각은 크게 벗어난다. 따라서 입사각(incidence angle)이 큰 경우 편차각(deviation angle) 모델에 적용되는 캠버각(θ)은 입구날개각과 출구날개각과의 차이로 정의되는 캠버각보다는 실제 유동을 고려한 입구유동각과 출구날개각의 차이로 정의되는 수정된 캠버각(K)을 사용하는 것이 적절한 것으로 판단된다.

Fig. 4와 5에서 수정된 캠버각(K)을 적용한 결과

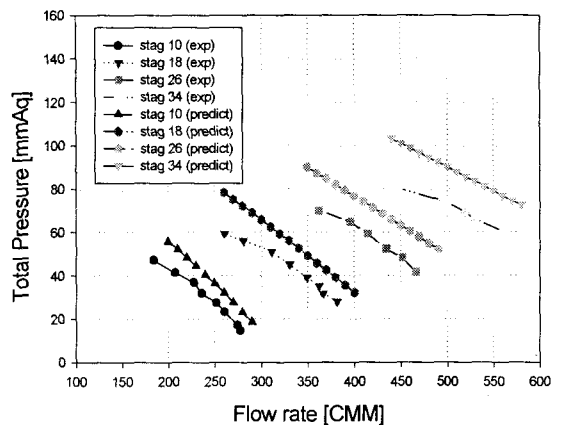


Fig. 6 Predicted and measured performance characteristics of fan A

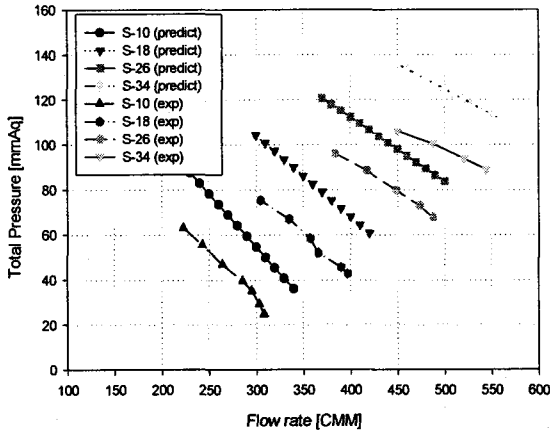


Fig. 7 Predicted and measured performance characteristics of fan B

출구유동각이 입구유동각보다 크게 나타나는 현상은 나타나지 않았고, 팁부분으로 갈수록 출구유동각이 상대적으로 작게 나타났다. 중앙과 팁부분의 출구유동각은 실제 유동과 비교하여 비교적 일치하는 경향을 보였고, 다른 설치각에 적용한 결과도 측정결과와 비슷한 경향을 보였다.

Fig. 6은 송풍기 A에 대하여 수정된 캠버각을 편차각 모델에 적용하고, 회전익과 고정익의 손실을 고려하여 성능을 예측한 결과이다. 동일 설치각에서 유량 변화에 따른 성능곡선의 경향은 송풍기 운전영역에서 서로 잘 일치한다. 이것은 실제 입구유동을 고려한 수정된 캠버각 적용의 결과로 판단된다. 압력은 성능측정 결과와 비교해보면 송풍기 운전범위 전체에 걸쳐서 높게 예측되었다. 이것은 손실모델의 정확성에 관련된 것으로 판단된다.

Fig. 7은 송풍기 B에 대하여 수정된 캠버각을 적용하고, 회전익의 손실을 고려하여 성능을 예측한 결과이다. 송풍기 A와 마찬가지로 운전영역에서 성능곡선의 경향은 일치하지만, 전체적으로 압력이 높게 예측되었다. 송풍기 B의 실험결과 압력이 송풍기 A에 비하여 높게 측정된 것은 회전익의 캠버각이 더 크기 때문에 압력이 크게 측정된 것으로 판단된다.

5. 결론

수정된 편차각 모델과 기존의 전압력 손실모델을 결합하여 캠버각과 피치가 다른 2가지 축류송풍기의

설계점/탈설계점에서 설치각 변화에 따른 성능을 예측하였고 성능 및 유동에 대한 측정 결과와 상호 비교하였다.

- 1) 본 연구에서 사용된 편차각 모델에서는 설치각 변화와 유량변화로 인한 입구각 변화를 포함할 수 있는 수정된 캠버각(K)을 적용하였다.
- 2) 유동측정과 수정된 편차각 모델을 사용한 결과가 비교적 잘 일치함을 확인하였다.
- 3) 송풍기 A와 B의 성능곡선에서 큰 캠버각과 슬리디티를 갖고 있는 B의 경우가 동일 유량에서 전체적으로 높은 압력을 나타내었다.
- 4) 편차각 모델과 전압력손실을 고려한 예측결과를 성능실험 결과와 비교해 볼 때, 그 경향은 서로 잘 일치함을 보였으나 압력 값은 송풍기 운전범위 전체에 걸쳐 높게 예측되어 개선이 필요하다.

참고 문헌

- (1) Lee, J. S., 1997, "Study on the analysis of axial flow fan using the streamline curvature method", MS thesis, Hanyang University, Seoul, Korea.
- (2) Lee, C., 1994, "On-design and off-design point performance analysis of the gas turbine axial flow compressor using streamline curvature method", Korean Journal of Aeronautical and Space sciences, Vol. 22, No. 1, pp. 28-37.
- (3) Kim, C. S., 1999, "An experiment study on the effects of stagger angle in performance characteristics of axial flow fan", MS thesis, Korea University, Seoul, Korea.
- (4) Lieblein, S., 1960, "Incidence and deviation angle correlations for compressor cascade", ASME J. Basic Eng., Vol. 72, pp. 575-587.
- (5) Lieblein, S., 1959, "Loss and Stall Analysis of Compressor Cascades", ASME J. Basic Eng., Vol. 81, pp. 387-400.
- (6) Lakshminarayana, B., and Horlock, J. H., 1963, Review : Secondary flows and losses in cascades and axial flow turbomachines, Int. J. Mech. Sci., Vol. 5, pp. 287-307.
- (7) Lakshminarayana, B., 1995, "Fluid Dynamics and Heat Transfer of Turbomachinery", Wiley Interscience, pp. 571~596