

축류형 송풍기 설계 과정에서 공력-음향학적 성능 예측을 위한 전산 프로그램의 개발

정동규* · 홍순성* · 이 찬**

Development of the Computer Program for Predicting the Aero-acoustic Performance in the Design Process of Axial Flow Fan

Dong-Kyu Chung*, Soon-Seong Hong* and Chan Lee**

ABSTRACT

Developed is a computer program for the prediction of the aero-acoustic performance characteristics such as discharge pressure, efficiency, power and noise level in the basic design step of axial flow fan. The flow field and the aerodynamic performance of fan are analyzed by using the streamline curvature computing scheme with total pressure loss and flow deviation models. Fan noise is assumed to be generated due to the pressure fluctuations induced by wake vortices of fan blades and to radiate via dipole distribution. The vortex-induced fluctuating pressure on blade surface is calculated by combining thin airfoil theory and the predicted flow field data. The predicted aerodynamic performances, sound pressure level and noise directivity patterns of fan by the present computer program are favorably compared with the test data of actual fan. Furthermore, the present computer program is shown to be very useful in optimizing design variables of fan with high efficiency and low noise level and in analyzing their design sensitivities.

1. 서 론

공기조화 및 산업용 설비에 광범위하게 사용되는 축류 송풍기는 공기를 일정한 압력과 유량으로 원하는 공간에 공급하는데 필수적인 장비로서, 국내에도 많은 송풍기 제작 업체들이 다양한 사양의 송풍기들을 제작하고 있다. 그러나 대부분의 국내 송풍기 업체들은 기존의 익형 및 익렬각 설계를 토대로 수요자의 요구에 맞는 송풍기를 선정하거나 역설계 방식에 의존하여 새로운 송풍기의 블레이드를 제작하는 방식에 의존해왔으며, 이러한 이유로 국산 축류 송풍기는 일반적으로 효

율이 매우 낮은 경향을 보여왔다. 그러나 최근 들어 점증하는 고효율 송풍기에 대한 수요자의 요구는 송풍기 제작사가 설계 단계에서부터 공기역학적 블레이드 설계를 최적화 하여, 운전 범위가 넓으면서도 고효율을 유지하는 송풍기를 개발하려는 시도에 촉진제가 되고 있다. 더 나아가, 급증하는 환경 친화적인 제품에 대한 수요자들의 관심은 송풍기 설계자나 송풍기를 응용한 시스템 설계자들에게도 소음 저감의 문제를 새로이 대두시키고 있으며, 이러한 추세는 앞으로 더욱 강화될 전망이다. 그러므로, 앞서 언급한 성능 및 소음의 두 가지 문제를 동시에 해결해 나가는 것이 송풍기 설계자들에게는 시급한 과제로 등장하고 있다.

이러한 산업체의 기술적인 애로사항을 해결하기 위해, 최근 들어서 학계를 중심으로 컴퓨터를 응용한 송

* CFTech 연구개발부

** 수원대학교 공과대학, 기계공학과

E-mail : cftech@chollian.net

풍기 성능 및 소음을 예측하는 해석방법들의 개발이 활발히 시도되고 있다. 그러나 대부분의 해석 방법들은 아직까지는 비교적 많은 계산시간과 입력자료를 요구하며, 계산방법의 선택 및 계산과정의 수렴을 위해서도 사용자가 고도의 전문성을 가져야 하므로, 기술력이 상대적으로 부족한 국내 송풍기 업체들이 설계 단계에서 사용하기에는 아직 많은 어려움이 있다.

그러므로 본 논문은, 국내 송풍기 업체의 현재 기술현황을 고려하여, 비교적 사용이 수월하면서도 예측의 신뢰성을 가지는 송풍기 성능 및 소음 특성 예측용 전산 프로그램을 소개하고자 한다. 본 방법은 송풍기 내부의 유동장은 유선곡률방법에 전압력 손실과 유동편차각 모델들을 결합하여 해석하며, 구하여진 유동장 예측결과를 바탕으로, 송풍기의 압력상승, 효율 및 동력등의 성능변수들을 산출하였다. 송풍기의 소음 예측을 위해서는, 블레이드 후류 내에서 와열(vortex street)을 가정하는 와홀림(vortex shedding) 모델, 박형 날개이론 및 유선곡률방법을 이용한 유동장 해석결과를 결합하여 송풍기 블레이드 표면의 접동압력 및 양력분포를 구하였고, 더 나아가 음압의 레벨 및 방향성은 소음의 쌍극자 방사형태를 가정하여 구하였다. 본 방법에 의한 송풍기 성능 및 소음 예측결과들을 실제 시험 결과들과 비교하여, 본 방법의 예측 정확도를 검증하였다. 비교 결과 본 방법이 고효율/저소음 송풍기를 설계함에 있어 매우 유용하게 사용될 수 있음을 알 수 있었다.

2. 전산 프로그램의 이론적 배경

2.1 유동장 및 성능해석 방법

축류형 송풍기 블레이드가 형성하는 유로 내부의 유동장을 해석하기 위해서는 유선곡률방법을 사용하였다. 유선곡률방법에서 유동장은 Fig. 1과 같이 블레이드와 블레이드 사이의 유면(S_1)과 블레이드 날개길이 방향의 유면(S_2)으로 나누어 생각하며, S_1 면의 유동을 접선방향으로 평균한 후, 그러한 평균 유동변수들로 표현되는 유선들에 의해 구성되는 S_2 면은 송풍기 블레이드 내부 유동장을 대표하게 된다. 평균 S_2 면의 유동에 대한 지배방정식은 Navier Stokes 방정식에서 점성항을 무시하고, 접선방향으로 평균하여 얻을 수 있다.⁽¹⁾

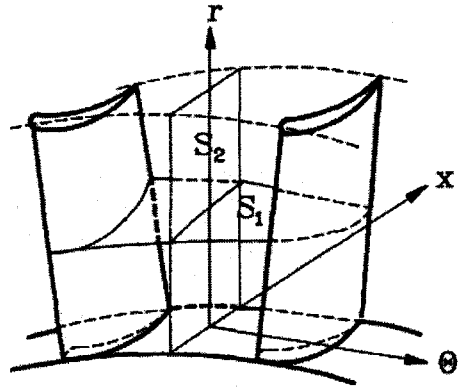


Fig. 1 Flow surfaces in fan blade rows

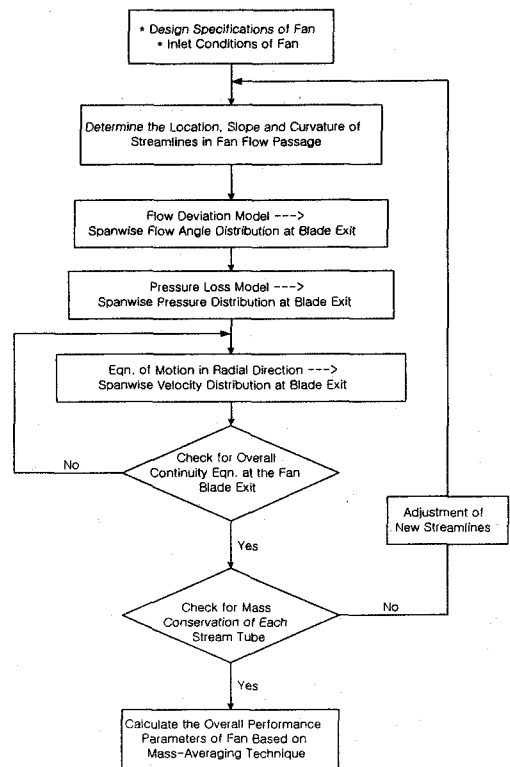


Fig. 2 Computation procedure of streamline curvature method

유선곡률방법은 송풍기 블레이드 입,出口的 계산지점에 대해 앞서 언급한 유동방정식에 블레이드를 빠져나가는 공기의 유동각 분포를 예측하는 유동 편차각 모델을 결합하고, 블레이드를 거치는 공기의 전압력손실을 예측하기 위한 모델들도 결합하여야 한다. 본 방

법에 사용한 유동방정식에 대한 수학적 표현, 유동 편차각 및 전압력손실 모델들에 대한 구체적인 내용들은 참고문헌⁽²⁾에 서술되어 있다.

Fig. 2에 도시되어 있듯이, 본 방법을 이용하여 주어진 풍량 조건에서 송풍기의 유동장 및 성능을 계산하는 과정은 다음과 같다. 우선적으로 블레이드 날개 길이 방향으로 다수의 유선 위치를 설정하고, 각 유선에 대해 유동 편차각 및 압력손실모델을 적용한다. 모델을 통해 계산된 블레이드 후방의 유동각 및 압력분포와 블레이드 허브에서의 축방향 속도에 대한 가정치(초기조건)를 가지고, 유동방정식을 풀어 날개길이 방향 속도분포를 구하며, 구해진 속도 분포가 송풍기 내부 유로의 전체 질량보존 조건을 만족하는지를 검토한 후 질량 보존식이 만족할 때까지 초기조건을 변화시키며 반복계산을 수행한다. 전체 질량 보존식이 만족되면, 그 다음 단계로 각 유선간의 유관(stream tube)을 흐르는 유량이 블레이드 입구의 값과 같은 지를 검토하고, 그에 따라 유선의 위치를 재조정 한 후 앞서의 계산 과정을 각 유관의 유량이 수렴될 때까지 다시 반복한다. 그리고 이런 과정을 거쳐 수렴된 유동장 결과들의 질량평균(mass-averaging)을 통하여, 주어진 유량 조건에서의 송풍기의 전체 성능 변수들(효율, 압력상승 및 동력)을 구할 수 있다.

더 나아가 본 방법은 송풍기 소음예측에 필요한 송풍기 블레이드 날개길이 방향의 속도분포 및 블레이드 후류의 경계층 두께 등도 유동장 해석과정 중에 계산되며, 이러한 계산결과들은 다음 절에서 기술되는 소음 해석과정에 사용된다.

2.2 소음 해석방법

유선곡률방법을 이용해 구한 송풍기 유동장 해석결과는 정상 상태를 가정한 결과이나, 실제로는 송풍기 블레이드 표면에서의 난류 유동이 가지는 압력변동에 의해 소음이 발생한다. 일반적으로 난류소음은 유속이 음속에 비해 충분히 작은 송풍기의 경우에는 쌍극자 음원(dipole distribution)으로 분류되고, 송풍기 블레이드 1개의 쌍극자 음원으로부터 발생하는 소음파위는 다음과 같이 표현된다.

$$e = \frac{1}{12\pi\rho a_0^3} \iint_S \frac{\partial p(x, y, t)}{\partial t} \frac{\partial p(x', y', t)}{\partial t} dS dS' \quad (1)$$

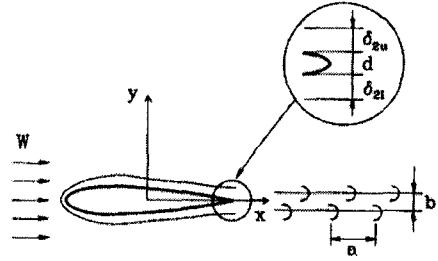


Fig. 3 Wake model of fan blade element

또한 Sharland⁽³⁾는 소음파위를 블레이드 표면의 섭동 압력에 대한 상관면적(correlation area)과 양력계수를 이용하여 다음과 같이 표현하였다.

$$e = \frac{\rho}{48\pi a_0^3} \int_{span} c V^4 S_c \langle [\frac{\partial C_L}{\partial t}]^2 \rangle dy \quad (2)$$

이때 y 는 블레이드 날개길이 방향의 좌표를, c, V 는 블레이드 시위길이와 후방의 유속을 의미하며, ρ 및 a_0 는 밀도 및 음속을 나타낸다. 식(2) 으로부터 송풍기 블레이드에서 생성되는 소음파위를 알기 위해, 유속분포는 유선곡률방법을 이용하여 구해지며, 추가적으로 날개길이 방향에 따른 블레이드 표면의 압력 섭동에 따른 양력계수(C_L)와 상관면적(S_c)에 대한 모델링이 필요하다.

본 전산 프로그램에서는 송풍기 소음의 해석모형으로서 Lee, Chung 및 Kim⁽⁴⁾에 의해 제안된 와류림(vortex shedding)모델을 이용하였다. 송풍기 소음은 주로 블레이드 후류의 와류에 의해 야기되는 블레이드 표면 양력섭동에 의해 야기된다는 가정하에, 블레이드 후류의 형태는 주로 2차원 Karman 와열(vortex street)에 의해 지배된다고 가정하였다. Fig.3는 3차원 송풍기 블레이드 입의 반경지점에서의 블레이드의 단면을 보여주고 있으며, 이러한 각 단면에서의 소음성분을 날개길이방향으로 합쳐줌으로써 송풍기 블레이드 전체의 소음을 구할 수 있다.

본 방법에서 블레이드 후류 두께를 평가함에 있어서, 유선곡률방법의 압력손실을 구하는 과정에서 예측되는 후류 두께를 이용하였다. 참고로 후류 두께는 블레이드 시위길이를 근거한 Reynolds 수, 블레이드의 유동각, 시위길이 및 간격 등의 함수로 표현된다. 또한 후류 내 와류의 간격, 강도 및 홀림 주파수는 고전적인 Karman 와열의 안정성 연구결과를 이용하여 결정

하였다.

후류내 와류에 의해 블레이드 표면상에 발생하는 섭동 압력을 계산하기 위해서는, 우선적으로 Karman 과 Sears 의 비점성 유동 이론을 이용하여 블레이드 표면으로부터 후방거리 점에 위치한 와류에 의해 야기되는 구속와도(bound vorticity)분포를 구해야 한다. 그리고 구해진 구속와도 분포와 비정상 Bernoulli 방정식으로부터 유도되는 박형 날개이론(thin airfoil theory)을 결합하여, 블레이드 윗면과 아랫면의 압력차에 의한 섭동 양력(fluctuating lift)을 구할 수 있다. 이러한 과정을 통해 구해지는 섭동 양력의 양력 계수 시간변동에 따른 평균치는 다음과 같이 계산된다.

$$\overline{\left(-\frac{\partial C_L}{\partial t}\right)^2} = 2\left(\frac{K\omega}{cV}\right)^2 \left\{ \left[\sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n (\alpha_n - 1) \right]^2 + \left[\sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{\omega c}{2V} \left(\alpha_n - \frac{2}{\alpha_n + 1} \right) \right]^2 \right\} \quad (3)$$

$$\text{여기서 } \alpha_n = \sqrt{\frac{\xi_n + c/2}{\xi_n - c/2}}$$

또한 V 는 공기의 유속으로 유선곡률방법에 의해 구해지고, ω 는 후류내 와류의 각홀림 주파수를 나타낸다. 그리고 c 는 블레이드 시위길이를 나타내며, ξ_n 은 블레이드 중심으로부터 후류내 n 번째 와류까지의 거리를 의미한다.

식(2)에 나타나는 섭동 압력에 대한 상관면적은 블레이드 시위길이 방향과 날개 길이 방향의 상관 길이의 곱으로 간주될 수 있고, Brooks 와 Hodgson⁽⁶⁾, Mugridge⁽⁶⁾ 에 의하면, 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$L_{span} \approx \frac{2V}{\omega}, \quad L_{chord} \approx \frac{6V_i}{\omega}$$

$$S_c = L_{span} L_{chord} \approx \frac{12VV_i}{\omega^2}, \quad (4)$$

이때 V_i 는 후류내 와류의 전진속도(advance velocity)를 나타내며, 앞서의 후류 해석모델을 통해 계산된다. 식(5)에서 알 수 있듯이, 상관면적도 섭동 양력과 마찬가지로 송풍기 블레이드 날개길이방향에 따라 변화된다.

앞서의 계산과정을 통해, 식(2)로부터 송풍기 블레이드 1개의 소음에너지가 구해질 수 있으며, 다수의 블레이드로 구성된 실제 송풍기의 경우에는 각각의 블

레이드들이 서로 상관되지 않는 소음원으로 작용하므로, 총 소음에너지(E)는 $E = e \times B$ 로 표현되고

$$E = \frac{B\rho}{2\pi a_0^3} \int_{span} \frac{K^2 V^3 V_i}{c} \left\{ \left[\sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n (\alpha_n - 1) \right]^2 + \left[\sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{\omega c}{2V} \left(\alpha_n - \frac{2}{\alpha_n + 1} \right) \right]^2 \right\} dy \quad (5)$$

이때 B 는 블레이드 숫자이다.

더 나아가 소음의 방사형태를 이상적 쌍극자 분포로 가정하면, 송풍기 블레이드 표면으로부터 수직거리에서의 최대 음압 및 임의 각도에서의 음압은 다음과 같이 구해진다⁽⁷⁾.

$$p_{max}^2 = \frac{3\rho a_0}{4\pi r^2} E, \quad (6)$$

$$p^2(r, \theta) = p_{max}^2 \cos^2 \theta \quad (7)$$

이때 r 은 송풍기 블레이드 표면으로부터 음압 관측점까지의 거리, θ 는 블레이드 표면에 수직인 벡터와 음압 관측지점 간에 이루는 각도를 의미한다. 그러므로 송풍기 소음의 기준인 음압 및 소음파워 레벨(Sound Pressure and Power Levels)은 다음처럼 정의된다.

$$SPL = 10 \log_{10} \left(\frac{p^2}{p_{ref}^2} \right), \quad PWL = 10 \log_{10} \left(\frac{E}{E_{ref}} \right) \quad (8)$$

이때 p_{ref} , E_{ref} 는 기준 음압 2×10^{-5} Pa, 기준 소음파워 10^{-12} Watt 를 의미한다.

3. 전산 프로그램의 구성

앞서 2장에서 서술된 내용을 토대로, PC의 Windows 환경에서 실행이 가능하고 사용자가 수월하게 사용이 가능하도록 전산 프로그램을 구성하였다. 본 전산 프로그램은 크게 송풍기 설계 변수를 입력하는 단계, 해석 단계 및 해석결과를 출력하는 단계로 구성하였다.

송풍기 설계변수를 입력하는 단계에서는, 설계된 송풍기의 케이싱 및 허브 직경, 블레이드 설계각도, 블레이드 시위길이 및 개수 등과 같은 송풍기 설계 제원과 송풍기 운전 및 입구조건들 (예: 입구온도 및 압력, 입

구 선회각 및 회전수 등) 그리고 소음 측정지점 및 각도에 대한 입력 정보들을 활성창을 통해 입력할 수 있게 전산프로그램을 구성하였다.

더 나아가 본 전산 프로그램에는 송풍기 블레이드의 익형으로 사용될 수 있도록 NACA 65-series, C4, DCA, Clark-Y 및 cambered plate 등의 총 12개의 기본 익형에 대한 데이터베이스가 우선곡률방법과 결합되어 있으며, 송풍기의 작동유체도 공기 뿐만이 아니라 연소가스 및 특수가스 등의 취급이 가능하도록 다양한 가스 물성치에 대한 데이터베이스가 포함되어 있다.

입력된 자료들을 가지고, 본 프로그램은 해석 단계에 있어서 다음과 같은 3가지 해석모드들의 선택이 가능하도록 구성하였다.

1) **유동장 해석 모드** : 주어진 유량조건하에서 송풍기 블레이드 날개길이 방향의 유동장을 예측한다. 이러한 해석모드는 블레이드 설계후 국부적인 유속, 유동각, 압력(손실) 및 확산계수(실속 여부) 분포를 예측하여, 좀더 공기역학적으로 효율적인 블레이드 형상을 설계하는 과정에 사용될 수 있다. 참고로, 본 프로그램에 의한 예측 결과는 본 논문의 Figs. 7-8 에 실험결과와 같이 비교되어 있다.

2) **성능곡선 예측 모드** : 송풍기의 유량 및 회전수 변화에 따른 효율, 송출압력 및 소요동력을 예측한다. 이러한 해석모드는 설계단계에서 송풍기의 탈설계점 성능 특성을 예측하는데 사용될 수 있다. Fig.4 는 본 프로그램을 이용하여 계산된 송풍기 유량 변화에 따른 효율, 압력, 동력 및 소음의 변화를 보여주고 있으며, Fig.5 은 송풍기 회전익 및 고정익의 블레이드 시위길리와 개수가 서로 달리 설계된 5가지 경우들의 효율 변화를 비교하고 있다.

3) **매개변수 해석 모드** : 송풍기의 주요 설계 변수들을 변화시켜 가며, 그때의 성능 및 소음이 어떻게 달라지는 지를 규명하여준다. 이러한 매개변수 해석결과는 고효율 및 저소음 송풍기의 설계변수 최적화를 위한 자료로 사용이 가능하다. Fig.6 은 본 프로그램의 매개변수 해석을 통해 구해진 회전익 블레이드 개수와 시위길리의 조합에 따른 송풍기의 설계점 효율 및 소음의 등가곡선을 보여주고 있다.

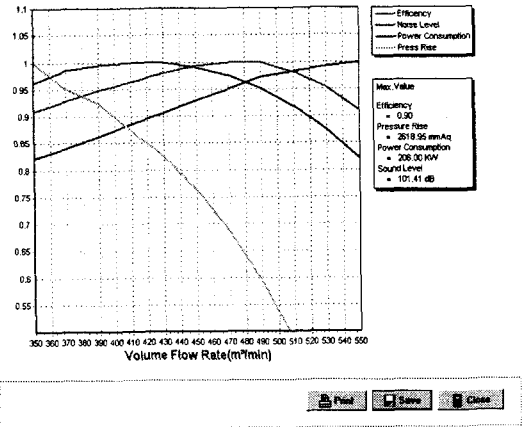


Fig. 4 Aero-acoustic performance map of fan

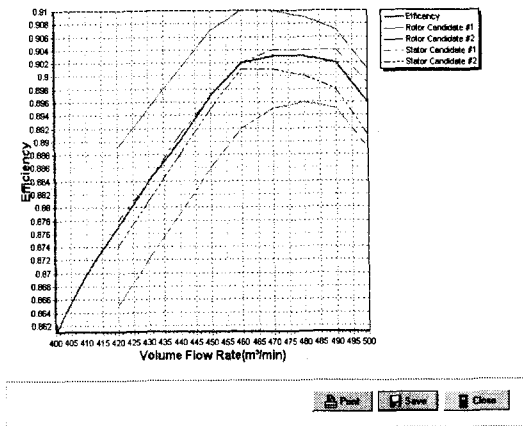


Fig. 5 Efficiency characteristics of five design cases

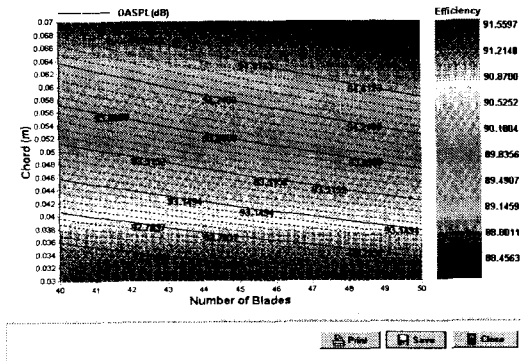


Fig. 6 Contour plot for the efficiency and the noise level of fan with the changes of blade variables

Table 1 Design Specifications of Test Fans

Fan ID	RPM	Duct radius (mm)	Hub to tip ratio	Rotor chord (mm)	No. of rotor blades
A	5900	203	0.591	82.6	12
B	3900	178	0.348	57.2	8
C	4700	178	0.348	57.2	8
D	1180	306	0.359	85.0	5
E	2800	254	0.474	57.2	14
F	2000	254	0.474	57.2	14
G	3500	160	0.400	21.3	24
H	1170	700	0.500	151.6	15

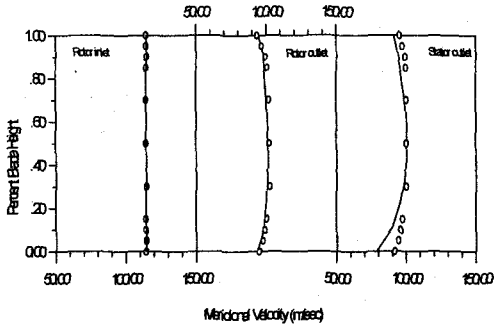


Fig. 7 Axial velocity profiles of fan

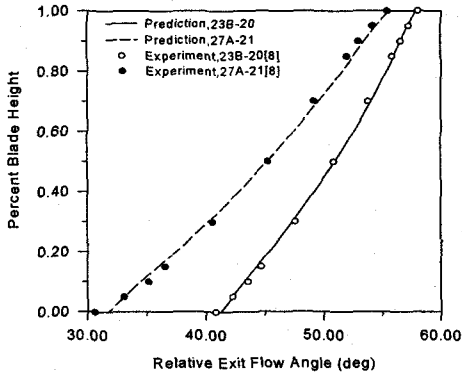


Fig. 8 Flow angle at rotor blade exit

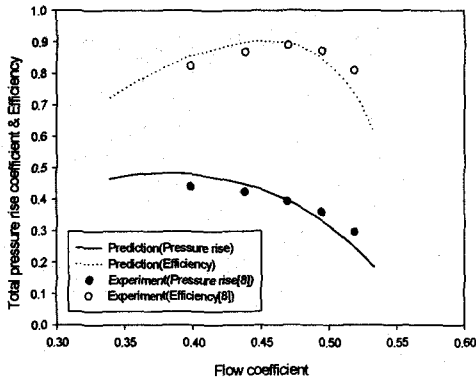


Fig. 9 Efficiency characteristics of high speed fan

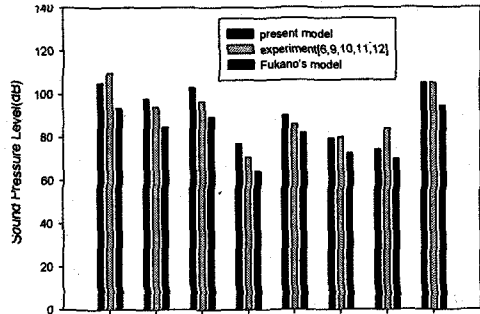


Fig. 10 Comparison of Fan Noise Levels

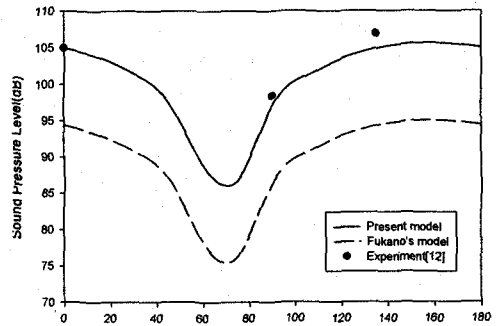


Fig. 11 Noise directivity pattern from fan H

4. 전산 프로그램의 검증

본 전산 프로그램을 이용하여 예측된 송풍기의 유동장, 성능 및 소음 해석결과들을 실제 고압 송풍기의

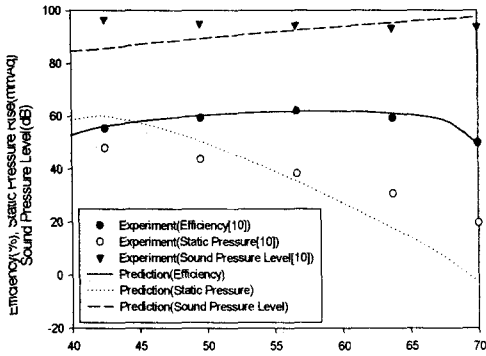


Fig. 12 Performance and noise level variations of fan B at off-design operation

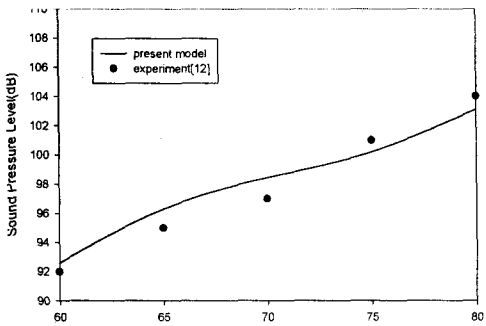


Fig. 13 Noise level variation with the stagger angle of fan H

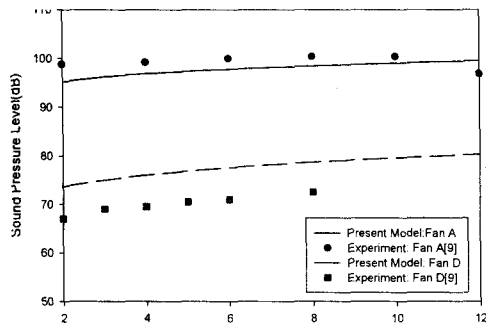


Fig. 14 Noise level variations with the number of blades of fan A and fan D

실험결과들⁽⁸⁾과 비교하였다. Fig. 7 은 고압/고회전 송풍기의 회전익과 고정익을 통과하는 공기의 축방향 유속 변화를 보여주고 있고, Fig. 8 은 송풍기 회전익

후방의 유동각 분포를 보여주고 있으며, 예측과 실험 결과가 잘 일치하고 있음을 볼 수 있다. 또한 Fig. 9 는 본 프로그램에 의해 예측된 성능곡선 예측결과를 시험결과와 비교하고 있으며, 유량변화에 대해서도 본 성능 예측방법이 비교적 신뢰할만 함을 보여준다.

Fig.10 은 서로 다른 설계 사양을 가지는 8개의 축류 송풍기들(Table 1 참고)에 대해 본 방법에 의한 소음 예측 결과들과 실제 소음 측정 결과들^(11,16,17,18,19)을 비교하고 있다. 예측결과들이 실험결과와 비교하여 최대 10% 오차 이내에서 잘 일치하고 있다. 비교 대상인 Fukano의 예측방법⁽¹⁸⁾에 비해서도, 본 방법이 훨씬 정확한 예측결과를 보여주고 있다.

Fig. 11 은 일정한 측정거리에서의 송풍기 소음의 방향성 예측결과들을 보여주고 있으며, 방향성을 나타내는 각도(θ)는 송풍기의 전방 축(front axis)으로부터 시계방향으로 측정된 각도를 의미한다. 그림에서 보여지듯이, 예측결과가 실험결과와 잘 일치함을 알 수 있었다.

축류 송풍기의 작동조건에 따른 탈설계점 성능 및 소음레벨 변화에 대한 예측 결과가 Fig. 12 에 표현되어 있다. Fig. 12 에서 보여지듯이, 유량 변화에 따른 송풍기의 토출압력, 효율을 본 방법이 잘 예측하고 있으며 소음레벨의 변화도 타당하게 예측되고 있다.

Figs. 13 과 14 는 송풍기의 블레이드 설치각도(stagger angle) 및 개수를 변화시킬 때 소음의 변화를 예측한 결과들을 보여주고 있다. 그림에서 보여지듯이, 본 방법의 예측결과가 실험 결과와 비교적 잘 일치하고 있으며, 이러한 결과들로부터 본 방법이 축류형 송풍기의 저소음 설계시 매우 유용하게 사용될 수 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

축류형 송풍기의 설계 단계에서 사용될 수 있는 유동장, 성능 및 소음 예측을 위한 전산 프로그램을 개발하였다. 본 전산프로그램에 의한 예측결과들은 송풍기의 성능 및 소음 측정결과와 비교적 잘 일치하였으며, 본 해석방법은 송풍기 설계변수가 성능 및 소음 특성에 미치는 영향을 규명하고 이를 통해 송풍기의 익형 설계를 최적화 하는데도 매우 유용함을 보여주었다.

후 기

본 연구는 한국과학기술원 신기술창업 지원단이 지원하는 제6차 중소기업기술무상양허 사업의 일환으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분들께 감사 드립니다.

참고 문헌

- (1) Novak, R.A., 1967, "Streamline Curvature Computing Procedure for Fluid Flow Problems," ASME J. of Eng. for Power, Vol. 89, pp. 487~490.
- (2) 김성곤, 1999, 축류형 송풍기의 성능 예측 방법에 대한 비교 연구 및 설계 개선, 석사학위 논문, 수원대학교.
- (3) Sharland, I.J., 1964, "Sources of Noise in Axial Flow Fans," J. of Sound & Vibration, Vol. 1, pp. 302~322.
- (4) Lee, C., Chung, M.K. and Kim, Y.H., 1993, "A Prediction Model for the Vortex Shedding Noise from the Wake of an Airfoil or Axial Flow Fan Blades," J. of Sound & Vibration, Vol. 164, pp. 327~336.
- (5) Brooks, T.F. and Hodgson, T.H., 1981, "Trailing Edge Noise Prediction from Measured Surface Pressures," J. of Sound & Vibration, Vol. 78, pp. 69~117.
- (6) Mugridge, D., 1971, "Acoustic Radiation from Airfoils with Turbulent Boundary Layers," J. of Sound & Vibration, Vol. 16, pp. 593~614.
- (7) Morse, P.M. and Ingard, K.U., 1968, Theoretical Acoustics, McGraw-Hill, New York.
- (8) Britsch, W.R., Osborn, W.M. and Laessig, M.R., 1979, NASA TP-1523, NASA.
- (9) Filleui, N.S., 1966, "An Investigation of Axial Flow Fan Noise," J. of Sound & Vibration, Vol. 3, pp. 147~165.
- (10) Longhouse, R.E., 1976, "Noise Mechanism Separation and Design Consideration for Low Tip-Speed Axial Flow Fans," J. of Sound & Vibration, Vol. 48, pp. 461~474.
- (11) Fukano, T., Kodama, Y. and Senoo, Y., 1977, "Noise Generated by Low Pressure Axial Flow Fans," J. of Sound & Vibration, Vol. 50, pp.63~88.
- (12) 손병진 외, 1992, 고효율 저소음 송풍기 개발에 관한 연구, 공업기술개발사업 1차년도 중간보고서, 상공부.