

축류형 송풍기 저소음 설계 프로그램의 개발 및 평가

⁰김기황*, 박준철*, 김진화**, 이승배**

Evaluation of Design Program of Low-Noise Axial Fan

⁰K.-H. Kim*, J.-C. Park*, J.-H. Kim** and S. Lee**

Key Words: **iDesignFan™**, Inverse Design(역설계)

ABSTRACT

An axial fan design code, called **iDesignFan™**, was developed. In this code, three major loss models were used to predicted the aerodynamic performance of a fan. The overall sound pressure level, predicted from steady blade loading, is also used as an input parameter from the third loop of the designing process to acquire most silent fan for the given aerodynamic performance parameters. With this kind of inverse design concept used in this code, the period of designing a fan, which has given aerodynamic performance with minimal acoustic noise, is significantly shortened. The experimental results of a prototype fan, designed by this code, showed that aerodynamic and acoustic performance of an axial fan is reasonably well predicted. Thus, one can design/develop an axial fan in a short time by using the code.

1. 서론

산업사회의 기술이 발전함에 따라서 소음원이 발생하게 되어 생활의 질적인 향상이 요구되는 선진사회에서 소음원에 대한 인간의 개선욕구도 소음원에 따라 다양하며 그 수준도 점차 높아 가고 있는 실정이다.

축류형 송풍기는 원심형 및 사류형 등에 비하여 상대적으로 비속도가 크고 비직경이 작아 동일한 직경 및 부하에서 큰 유량을 얻을 수 있는 장점을

지닌다. 따라서 축류형 팬은 산업용 송풍기뿐만 아니라 공조기기, 자동차/중장비의 냉각팬, 에어컨 실외기, 냉장고 등의 가전제품, 그리고 컴퓨터 CPU 냉각팬 및 각종 O.A.기기, 네트워크 장비등의 냉각장치등 그 활용범위가 매우 광범위한 유체기계중의 하나이다.

이러한 축류형 팬의 성능과 관련된 변수들은 회전수(N), 직경(D), 전압(P_T) 등이 있으며, 이러한 성능변수와 밀접한 유속변수로는 평균축방향속도(C_m), 유입스윙속도(C_{01}), 출구스윙속도(C_{02})가 있다. 또한 팬날개형상과 관련된 변수들로는 입구날개각(β_1), 출구날개각(β_2), 캠버각(θ), 설치각(ξ), 전향각(δ), 영각(i), 코드길이(c), 현절비(σ), 스윙각 등이 있다. 따라서 모든 축류형 팬의 설계는 주어진

* 인하대학교 기계공학과

** 정희원, 인하대학교, 기계공학과, 에어로네트

작동점에서 요구되는 성능을 발휘하도록 이들 변수들을 적절히 조합하는 방법과 연관되어 있다.

축류형 팬의 설계 단계는 이차원 익렬이론을 바탕으로 하여 각 익렬에 대한 실험식과 상관식을 이용하는 평균유선법⁽¹⁾, 손실모델을 고려한 피치평균의 비점성 유동해석인 통과유량법(Through-Flow Method)⁽²⁾, 그리고 삼차원 점성 수치해석적 방법을 이용한 최적화설계⁽³⁾로 구분될 수 있다. 또한 다양한 시제품들에 대한 성능시험을 통해 얻어진 자료들을 데이터베이스화하여 고객이 원하는 조건에 적합한 표준제품을 자동으로 선정해 주는 연구도 수행되고 있다.⁽⁴⁾

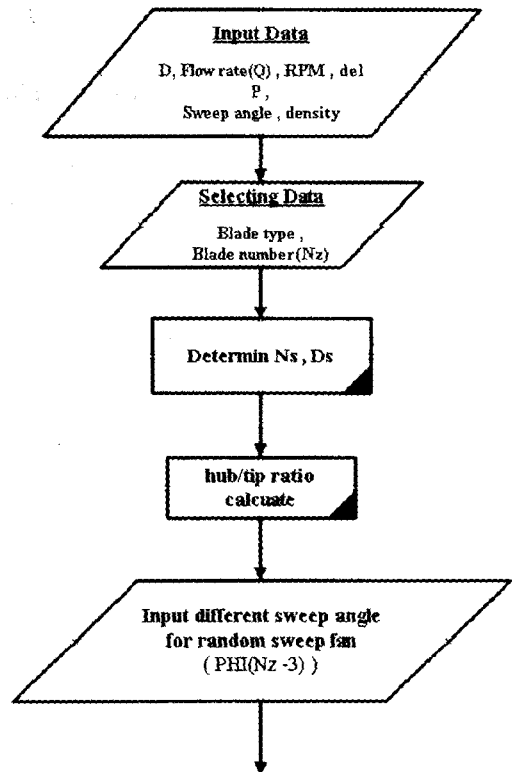
축류형 팬의 성능을 향상시키는 노력이 어느 정도 성과를 거두면서, 저소음화에 대한 많은 시도가 이루어지고 있으나 많은 변수들로 인해 각 변수들의 소음에 대한 기여도 평가 및 이를 고려한 설계는 더더욱 어려운 실정이다. 이러한 기술적 어려움을 극복하기 위해 저소음 설계의 보조적 수단으로 주어진 팬형상 및 작동조건으로부터 팬소음을 예측할 수 있는 소음해석 소프트웨어들이 최근 많이 개발되고 있다. 현재 국내에서 개발된 팬소음해석 소프트웨어는 두가지방법으로 나누어진다. 첫째는 팬날개 주위의 비정상 와동을 비점성적 방법으로 계산한 후, 이를 바탕으로 음향학적 상사성 이론 및 팬 케이싱등에 의한 산란, 반사 및 회절을 계산하는 경계요소법을 이용하여 소음장을 예측하는 방법⁽⁵⁾과 설계변수에 의해 예측되는 양력계수분포를 이용하여 정상하중소음을 예측하는 방법⁽⁶⁾, 그리고 날개후단에서의 와동모델을 바탕으로 한 비정상양력에 의한 소음예측방법⁽⁷⁾, 그리고 삼차원 난류유동을 계산한 후, 이와 함께 CAA방법을 이용하여 FW-H방정식을 계산하는 방법이다.⁽⁸⁾

본 연구에서는 역설계 개념을 도입하여, 주어진 회전수에서 유량과 전압을 갖는 팬의 최적의 형상을 평균유선법과 손실을 고려한 성능예측을 통해 손쉽게 구현하며, 반복 설계과정 중 계산되는 설계변수들에 의해 예측되는 양력계수분포를 이용하여 정상하중소음을 예측하여 저소음이 되도록 하는 소프트웨어인 **iDesignfan™**을 개발하였다.

2. 공기역학적 설계방법

설계 프로그램의 계산과정은 아래 그림과 같다. 아래 그림에서 보듯 입력 부분과 날개 형상 변수 계산 부분, 성능예측 부분, 날개 삼차원 형상 계산 부분, 소음예측 부분으로 나누어진다. 입력부분에서 여러 경우의 수를 고려하였고, 각각의 경우에서 축류팬에 적당한 작동 조건을 찾도록 설계하였다. 판별 기준으로는 비속도와 비직경을 사용하였고, 입력 부분의 모든 계산은 날개 형태와 관계없이 적용하였다.

iDesignfan™ flow chart



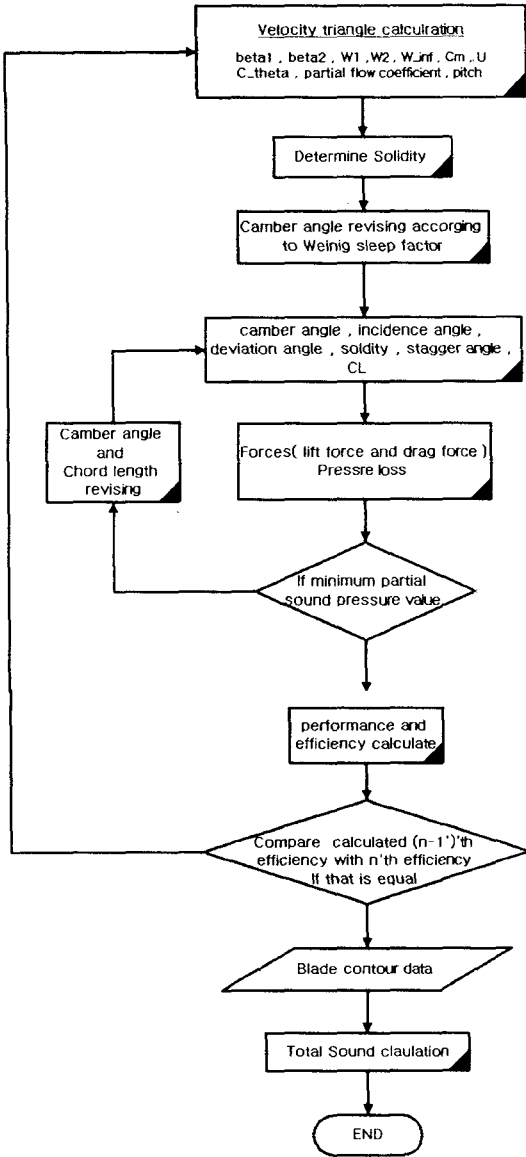


Fig. 1 프로그램 순서도

설계 변수들은 반경방향으로 한 날개를 31등분하여 각 미소 단면마다 Howell⁽⁹⁾의 2차원 관계식을 이용하여 계산하였다.

$$i = i_0 + \left(\frac{n_0}{\sigma^c} \right) \theta \quad (1)$$

$$i_0 = f(\sigma, \beta_1), \quad n_0 = f(\sigma, \beta_1), \quad c = f(\sigma, \beta_1)$$

$$\delta = \delta_0 + \left(\frac{m_0}{\sigma^b} \right) \theta \quad (2)$$

$$\delta_0 = f(\sigma, \beta_1), \quad m_0 = f(\sigma, \beta_1), \quad b = f(\sigma, \beta_1)$$

i : incidence angle, δ : deviation angle.

θ : camber angle, σ : solidity, β_1 : inlet flow angle, β_2 : outlet flow angle

압력 상승을 맞추기 위해 코드길이(c)를 조정하였다. 코드길이(c)가 변할 때마다 현절비(σ)가 변하게 되고 그와 관련된 여러 변수들이 바뀌게 된다. 그래서 압력상승을 맞출 때마다 현절비(σ)와 관련된 모든 변수들을 다시 계산하였다. 계산을 통해 수렴한 변수들을 날개 끝에서 발생하는 슬립을 고려하여 다시 계산해 주었으며, 최종적으로 소음을 고려하여 캠버각(θ)과 코드길이(c)를 결정하였다. 위 과정들은 효율이 수렴할 때까지 반복 계산되며, 효율이 수렴하였을 때 변수 값들을 이용하여 웬의 삼차원 형상 수치들을 계산하였다. 삼차원적으로 형상을 구현 할 때는 회전하는 물체 표면에서의 유선(stream line)을 고려하여 날개를 형상화하였다. 위 과정은 한 날개를 30등분하여 수행하였으며, 결정된 수치들로 아래 Fig. 2와 같이 날개를 형성해 나간다.

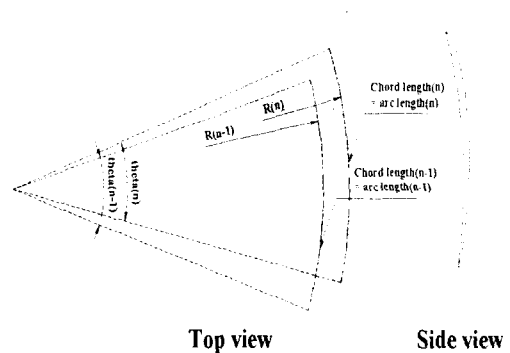


Fig. 2 날개 형성과정

위의 과정들을 거쳐 최종적으로 설계된 팬의 삼차원 형상은 Fig. 3과 같다.

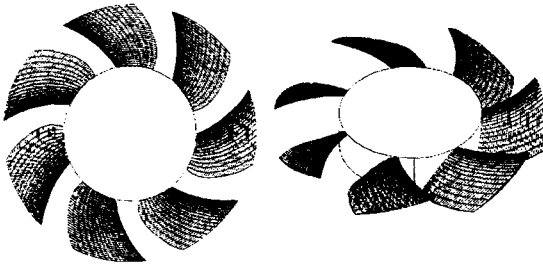


Fig. 3 팬 삼차원 형상

iDesignFan™ 프로그램에서는 설계변수들과 설계조건들을 그래프나 표로 나타내주어 사용자가 쉽게 팬 특성을 알아보고 판별할 수 있도록 되어 있어 빠르게 원하는 팬을 찾아낼 수가 있다. **iDesignFan™** 프로그램의 장점은 팬의 형상을 빨리 계산해 낼뿐만 아니라 소음과 성능까지도 빠르게 예측을 한다는데 있다. 프로그램의 입·출력은 아래 Fig. 4와 같이 나타낸다.

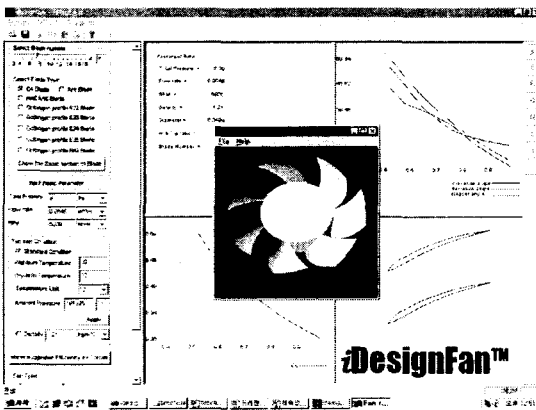


Fig. 4 iDesignFan™ 설계프로그램 입·출력창

이러한 방법을 이용한 **iDesignFan™** 을 이용하여 5개의 시제품을 설계 제작하여 성능과 소음

을 측정하고 이를 예측된 값과 비교하였다. 팬의 직경은 모두 4.6 cm 으로 여기서 비교된 시제품의 그것과 동일하다. 자세한 실험방법은 이번 학회에서 발표될 김기황 등⁽¹⁰⁾의 논문에 잘 나타나 있다.

3. 팬 소음 계산 모델

프로펠러형 팬의 소음계산에 있어, LES를 이용하여 직접 소음을 예측하는 것은 현재의 계산능력으로는 상당히 많은 시간이 소요되기 때문에 본 연구에서는 예측된 정상상태의 양력 및 항력을 기초로 다음과 같은 Ffowcs Williams - Hawkins (FW-H)⁽⁸⁾ 방정식을 이용하여 $r/D=33$ 인 원거리장에서의 정상하중(steady loading)에 의한 noise를 계산하였다.

$$P_M'(x, t) = \frac{1}{4\pi} \int_{f=0} \left[\frac{\rho_o \dot{v}_n}{r^2(1-M_r)^3} \right]_{ret} ds + \frac{1}{4\pi} \int_{f=0} \left[\frac{\rho_o v_n (r \dot{M} \cdot x + c_o M_r - c_o M^2)}{r^2(1-M_r)^3} \right]_{ret} ds \quad (3)$$

$$P_D'(x, t) = \frac{1}{4\pi c_o} \int_{f=0} \left[\frac{F \cdot r}{r(1-M_r)^2} \right]_{ret} ds + \frac{1}{4\pi} \int_{f=0} \left[\frac{F_r - F \cdot M}{r^2(1-M_r)^2} \right]_{ret} ds + \frac{1}{4\pi c_o} \int_{f=0} \left[\frac{f_r (r \dot{M} \cdot x + c_o M_r - c_o M^2)}{r^2(1-M_r)^3} \right]_{ret} ds \quad (4)$$

Fig. 5에는 500 rpm에서 직경이 30.25 cm인 DRL fan에서의 소음 방향성과 음압이 나타나 있다. 쌍극자만을 고려하여 계산한 음압레벨의 크기 및 방향성은 실험결과와 잘 일치하였다. 계산으로부터 얻어진 음압레벨은 실험조건에서의 회전속도와 측정거리를 고려하여 실험치와 비교하기 위해 스케일링하였다. 여기서 0° 는 fan의 축방향으로 유동방향은 0° 에서 180° 쪽이다. 이 결과로부터 정상하중(steady loading)만을 고려해도 팬의 원장소음은 충분한 정도로 예측됨을 알 수 있다.

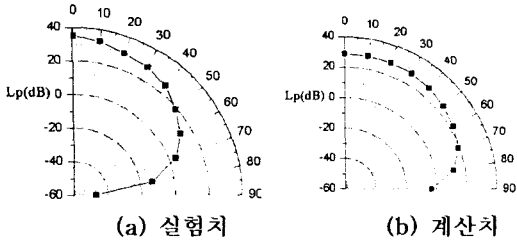


Fig. 5 음압레벨 극선도(Polardiagram)
(r/D=33, 500rpm)

4. 성능 예측 모델 및 검증

성능예측은 Lieblein의 형상 손실과 End-wall 손실 그리고 Tip Clearance 손실 모델을 이용하여 계산하였다. 형상손실 (ΔP_p)은 Lieblein의 모델을 사용했는데 이는 다음과 같다.

1. Lieblein profile loss

$$\Delta P_p = \frac{\frac{1}{2} \rho W_1^2 \left(\frac{\cos \beta_1}{\cos \beta_2} \right)^2 (1 + E_p)}{\left[1 - \left(\frac{\theta}{c} \right) \frac{H\sigma}{\cos \beta_2} \right]^3} \left(\frac{\theta}{c} \right) \frac{\sigma}{\cos \beta_2} \quad (5)$$

2. End-wall loss

$$\Delta P = \psi \left(\rho \frac{W_1^2}{2} \right) \left[1.0 - \frac{1.0 - \left(\frac{2\delta^*}{g} \right) \left(\frac{g}{h} \right)}{1.0 - \left(\frac{2v^*}{2\delta^*} \right) \left(\frac{2\delta^*}{g} \right) \left(\frac{g}{h} \right)} \right] \quad (6)$$

3. Tip Clearance

$$\Delta P \sim \frac{C_L^2}{A} \frac{C}{S} \frac{r}{S} \frac{\cos^2 \beta_1}{\cos^2 \beta_m} \quad (7)$$

위 손실모델을 이용하여 효율을 결정하였으며, 계산된 효율에 맞게 설계된 날개형상을 변수들을 이용하여 성능을 예측하였다. 본 설계프로그램 (iDesignfan™)으로 설계한 냉각팬을 직접 제작하여 실험을 통해 성능을 검증해 보았다. 본 연구에서는 직경(D)이 4.6mm이고 설계 유량 0.004m³/s이며 설계 압력이 8 Pa인 CPU 냉각팬이 사용되었다.

이 프로그램으로 설계한 날개 7개인 팬의 예상 성능곡선이 Fig. 6에 나타나 있다. 여기서 설계점은 유량계수가 0.5일 때이다. 이 예상 성능곡선도는 일반적인 축류팬의 그것과 유사하다. 시간이 촉박하여 실험치와 예상치의 자세한 비교 검토는 학회에서 발표할 예정이다.

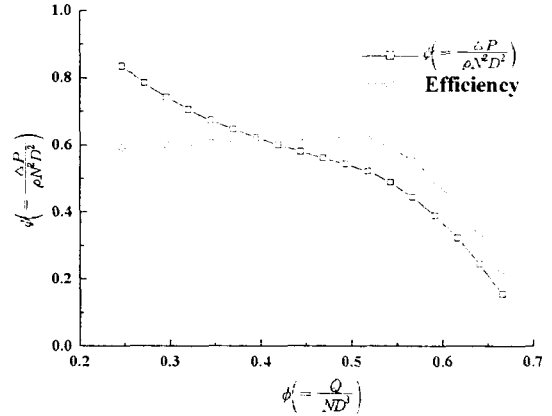


Fig. 6 성능곡선

5. 결론

역설계 개념을 이용하여, 주어진 회전수에서 유량과 전압을 갖는 팬을 신속히 설계하여 주는 팬 설계 프로그램 iDesignfan™을 개발하였다. 이 프로그램은 설계된 팬의 도면을 작성해주고 여기서 생성된 3차원 형상데이터를 S.L.S. 기계로 전송하면 설계된 팬의 시제품을 며칠내에 제작가능케 하여준다. 또한 설계점 및 탈설계점에서의 성능과 소음을 예측하여 제공한다.

이 프로그램을 이용하여 팬 시제품을 설계 및 제작하여 실험을 행하였다. 실험을 통해 성능과 소음예측을 검증해 본 결과, 예상 소음과 성능이 실험결과와 어느 정도 잘 일치하였다.

따라서, 본 연구에서 개발한 소프트웨어인 iDesignfan™을 이용하면 빠르게 팬을 설계할 수 있으며, 신뢰할 수 있는 성능 및 소음 예상치를 얻을 수 있다. 이 프로그램을 산업체에 이용할 경

우 필요로 하는 성능과 소음을 갖는 팬을 보다 빠르게 설계할 수 있어 팬설계 및 선정하는데 많은 시간과 비용을 줄일 수 있으리라 기대된다.

참고문헌

1. Lee S., Choi J.-K. and Park Y.-S., 1997, "A Method of Designing a Low Noise Propeller Fan," ASME FEDSM'97, pp. 1-9
2. 김성근, 1999, 축류형 송풍기의 성능 예측 방법에 대한 비교 연구 및 설계 개선, 석사학위 논문, 수원대학교
3. 최재호, 2000, 유체기계의 공력설계를 위한 수치 최적화기법, 박사학위논문, 인하대학교
4. 김희룡, 2000, "산학연 연구를 통한 축류송풍기의 표준제품 선정 software 개발," 2000년도 하계 송풍기기술 Workshop, pp. 53-57
5. 전완호, 이덕주, 2000, "덕트가 있는 축류팬의 유동 및 음향장 해석," 유체기계저널, 제 3권 제2호, pp.15-23
6. Sharland,I.J., 1964, "Sources of Noise in Axial Flow Fans," J. of Sound & Vibration, Vol.1, pp.302-322
7. 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
8. 배일성, 장성욱, 이승배. 2001, "DRL 축류팬 주위의 난류유동 및 공력소음의 계산," 소음 진동학회 춘계학술대회 논문집(계재예정)
9. Wright, I, 1999, *Fluid Machinery*, CRC Press LLC
10. 김기황, 박용민, 김진화, 이승배. 2001, "Development of Micro-Cooling Fans for Cooling of CPU,"소음 진동학회 춘계학술대회 논문집(계재예정)