

원심형 후향익 및 원심다익팬의 설계 프로그램

박준철* · 손정민** · 이승배*** · 조성민****

Design Program of Centrifugal Backward-Bladed and Forward-Bladed Fans

J.-C. Park*, J.-M. Son**, S. Lee**, J.-S. Min****

Key Words : **iDesignFan™**, Inverse Design(역설계), Centrifugal Fan(원심형 팬)

ABSTRACT

A centrifugal fan design code was developed and included in **iDesignFan™**. This program generates forward-curved and backward-curved bladed centrifugal fan data. With the inverse design concept used in the code, the period of designing a fan, which has given aerodynamic performance with minimal acoustic noise, is significantly shortened. A centrifugal fan design code, developed in this study and included in **iDesignFan™**, predicts the aerodynamic performance by using mean-line analysis and various loss models. In the period of design a lift force distribution between pressure side and suction side of blade is calculated. And then it is used to calculate steady loading noise from the impeller.

1. 서 론

원심형 팬은 설계방식에 따라 후향익 송풍기(KARSE B 0018⁽¹⁾)와 다익송풍기(KSB6326⁽²⁾)로 불려지는 전향익 송풍기로 크게 나뉜다. 또한 용도에 따라 급기팬, 배기팬, 순환팬, 승압팬으로 구분되어진다. 최근 제정된 KSRSE B 0018과 개정 예정인 KS B 6226에는 임펠러의 깃 바깥 지름이 160 mm에서부터 1800 mm까지 22가지 크기로 구분되어 있다⁽³⁾.

일반적인 원심형 팬의 성능과 관련된 변수들로는 회전수 (N), 정압 (ΔP_s), 유량 (Q), 직경 (D) 등이 있다. 이러한 성능변수들과 밀접한 관계를 가지는 유속변수들로는 입구속도 (C_1), 로우터 출구속도 (C_2), 볼류트 출구속도 (C_3)이며, 팬의 형상과 관련된 변수로는 입구 (b_1), 출구 폭 (b_2),

입구 날개각 (β_{1b}), 출구 날개각 (β_{2b}) 등이 있다.

또한 원심팬의 성능은 임펠러 내부의 마찰이나 유동박리 등에 의한 압력손실에 영향을 받으며, 이러한 손실은 임펠러 입구와 출구의 면적비, 회전속도, 입구와 출구의 면적, 날개의 압출구각, 날개이 개수와 형상 등에 영향을 받는다고 알려져 있다⁽⁴⁾. 그러나 시로코팬의 성능 예측시에는 일반적인 후향익 팬의 식에 만든 수정이 필요하며, 최근에 시로코 팬 특유의 형상과 유동 형태를 감안하여 성능 및 공력소음예측이 수행된 바 있다⁽⁵⁾.

원심형 팬의 소음 저감 방법으로는 cutoff간극의 증가, 임펠러 깃과 cutoff 가장자리 각도의 조절, 임펠러 깃의 안쪽에 천이 메쉬의 설치, 임펠러 깃의 비대칭적인 배치 등으로 요약되어지며 이러한 소음 저감 설계는 성능예측과 병행되어야만 효과적이다. 하지만 이제까지의 원심형 팬의 소음 저감은 팬 자체의 설계방법에 의한 것이 아니라 주위 환경을 변화시킴으로써 소음을 줄이는 방법이 주로 고찰 되어왔다.

본 연구에서는 주어진 회전수에서 성능에 영향을 미치는 여러 가지 설계변수들을 조합하여 요구되는 성능을 내는 팬의 최적의 형상을 평균유선법을 이용한 역설계와 손실모델을 고려한 성능 예측을 수행한다. 또한 반복 계산 과정 중에 날개의 압력면과 부압면에 작용하는 압력차에 의한 이극원 분포를 이용하여 정상하중소음을 예측하여 저소음이 실현되도록 하였

* (주) 에어로네트
E-mail : jcpark@aeronet.co.kr
Tel : (032) 429-9798, Fax : (032) 429-9799

** (주) 에어로네트
*** 인하대학교 기계공학과, 정회원

**** (주) Haatz

다. 그리고 입력과정에서 Visual C++의 MFC를 이용하여 window를 디자인 하였으며, 출력에서 입력값을 다시 유도하는 역설계 개념을 도입하였다.

2. 저소음 팬의 설계과정

2.1. 전향익 팬의 설계

원심다익 팬의 일종인 시로코팬은 전향익(forward-curved blade)를 가지고 있으며, 소형으로도 많은 유량을 낼 수 있으며 또한 동일한 유량에서 축류형이나 후향익(backward-curved blade) 원심형 팬보다 소음이 낮아, 낮은 효율에도 불구하고 현재 공조기기, 환기장치, 주방기기 등에 널리 사용되어지고 있다.

2.1.1 임펠러의 설계

우선 입력된 정압, 유량, 회전수, 외경으로부터 입구 직경을 구하게 된다. 원심형 팬의 내외경비는 유량계수의 함수로 나타낼 수 있으며 그 관계식은 다음과 같다⁽⁶⁾.

$$\frac{d}{D} = \phi \frac{1}{Bz}^{1/6} = \left(\frac{2}{\pi} \frac{7/6}{1/3} \right) \phi^{1/3} \quad (1)$$

여기서 $\phi_{BP} = \frac{Q}{\frac{\pi}{4} D^2 U_2}$; $\phi = \frac{Q}{ND^3}$

날개의 입구각을 구하기 위하여 입구의 면적을 구하려면 우선 입구 폭을 결정해야 한다. 입구에서의 유동은 그 유동방향이 90°에 가깝게 변화하게 된다. 따라서 일반적인 후향익 팬의 경우 급격한 유동방향의 변화에 의한 박리 현상을 줄이기 위하여 입구에서의 면적을 흡입면적 보다 작게하여 유체를 가속 시키는데 반하여 시로코팬의 경우에는 입구면적을 증가시켜 유체를 감속시킴으로써 박리 현상을 줄이는 방법을 사용한다.

입구에서의 날개각 (β_{1b})을 결정하는데 있어서는 날개의 두께가 입구 면적에서 차지하는 비율을 고려하여 계산한다. 또한 날개수가 무한개인 경우에는 유체입자가 날개각과 같은 방향으로 흐르지만 실제의 경우에는 날개수가 유한개이고 이에 따라 유동방향이 날개방향과 달라지게되므로 이 차이(incidence angle)를 고려하여 날개의 입구각을 결정하게 된다.

출구에서의 날개각 (β_{2b})을 결정 하는데 있어서는 출구에서의 반경방향 속도 분포와 동력전달 손실을 보완해주는 미끄럼 계수식을 고려한다. 출구에서의 유동은 반경방향 속도가 큰 영역과 그렇지 못한 영역으로 나누어지므로 그에 따른 영향을 고려하여 출구에서의 반경방향 속도를 구하였다. 입구에서와 마찬가지로 날개수가 무한개일 경우와 달리 실제 경우에는 날개수가 유한하므로 출구에서의 유동각이 날개각과 차이를 보이게 된다. 이러한 동력전달의 손실을 보완해주는 미끄럼 계수를 사용하여 날개 출구각을 결정한다. 뒷굽음깃 원심형 팬

Table 1. 설계 입력값

	유량 [CCM]	정압 [mmAq]	직경 (mm)	회전수 (rpm)	비고
Test 1	1100	340	1275.1	1276	후향익
Test 2	4.3	4.31	95.	2187	후향익
Test 3	3.83	12	150.	1530	전향익

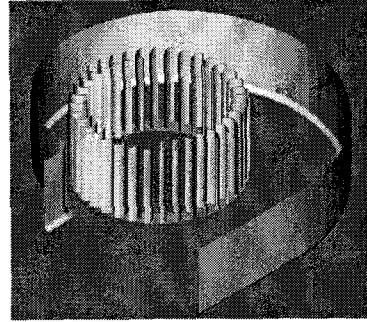


Fig. 1 설계된 전향익 임펠러의 형상

또는 원심압축기에 사용되는 미끄럼 계수식은 많이 나와 있으나 날개의 출구각이 90°보다 훨씬 큰 시로코팬에는 적당하지 않다⁽⁵⁾. 따라서 본 연구에서는 일반적으로 사용하는 Stodola와 Eck식 대신 Yamazaki(1987)⁽⁷⁾가 제시한 미끄럼 계수식을 사용하였다. 이와 같은 방법으로 입력 설계변수가 아래 Tabl의 Test3로 주어지는 경우에 대해 설계된 임펠러 및 블류트의 형상은 Fig1과 같다.

2.1. 블류트의 설계

블류트는 임펠러로부터 나온 유체를 모으는 곳인 동시에 블류트로 나온 공기의 동압을 정압으로 바꾸어 주는 곳이다. 따라서 블류트로 들어오는 공기의 손실이 최소가 되도록 설계하여야한다. 블류트 설계에 사용되는 식은 자유와동이론에 기초하여 다음과 같이 구하였다.

$$r = r_3 \exp(\theta \tan \alpha_s) \quad (2)$$

여기서 θ 는 라디안이고, α_s 는 블류트의 확장각이다. 블류트의 확장각은 임펠러 출구에서의 유동각과 같이 설계한다.

블류트의 컷오프 간극은 팬의 성능과 소음에 크게 영향을 미친다. 컷오프 간극이 너무 작은 경우에는 유동현상이 불안정해짐에 따라 소음 발생이 급격히 커지게 된다. 일반적인 원심형팬의 경우 컷오프 간극은 직경의 9%에서 12%정도이며, 부하가 큰 블로워나 압축기의 경우에는 이보다 작은 6%에서 10%정도로 결정한다⁽⁶⁾.

본 연구에서는 블류트를 네 영역으로 나누어 손실이 최소화되면서 정압 상승이 일어나도록 설계하였다. 이와 같은 방법으로 입력 설계변수가 아래 Tabl의 Test3로 주어지는 경우에 대해 설계된 임펠러 및 블류트의 형상은 Fig2와 같다.

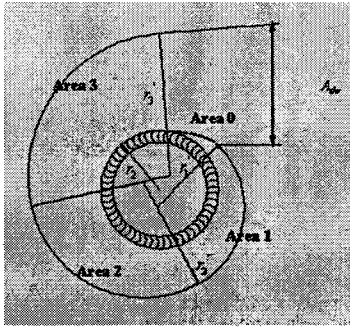


Fig. 2 볼류트의 형상

2.2. 후향익 팬의 설계

일반적인 원심형 팬들은 후향익(backward curved-blade)을 가지고 있으며, 제작의 용이성과 넓은 유량 범위에서 작동하므로 다양한 용도로 많이 사용되고 있다. 그러나, 작동점을 일치시키지 않고 작동하면 효율이 떨어지는 것은 물론이고 재순환이나 유동박리 등이 발생하여 유체기계의 성능에 좋지 않은 영향을 미치게 된다. 성능예측과 이에 해당하는 소음을 예측하기 위해서는 입구와 출구의 반경비, 입구와 출구의 폭, 입구와 출구의 날개각도, 날개의 개수, 익형의 종류와 폭, 볼류트 등의 설계변수 등이 적절히 조절되어야 한다.

2.2.1. 임펠러의 설계

먼저 입력된 정압에 출구에서의 동압을 가정한 후 전압을 구한다. 다음 단계로는 최적 입구폭(b_1), 최적 입구 직경(D_1)을 결정한다. 최적 입구폭은 유체가 입구에서 가속되는 현상을 고려하여 입구면적이 흡입구의 면적보다 20%정도 작게 설계한다. 사실상 입구를 유선에 맞추어 설계할 수 없으므로 속도가 증가하는 것을 고려하면, 임펠러 출구 면적도 임펠러 입구 면적보다 작아야 한다. 그러나 사용자가 입구와 출구의 비직경을 입력하게 되는데, 이를 Fig. 3과 같이 유량계수(ϕ)와의 상관 관계로 적당한 비직경을 입력하게끔 유도하게 된다.

평균유선에서의 속도삼각형이 구해지면 입구와 출구의 날개각과 비직경으로 인하여 날개 개수가 구해진다. 이때 구해진 날개 개수로 다시 미끄럼 계수를 구하며, 이를 반복하여 적당한 미끄럼 계수와 날개 개수를 구한다. 그리고 이탈각을 계산할 때 후향익 원심형에서는 원심형 현절비(approximate

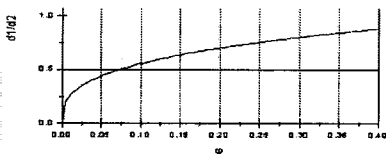


Fig. 3 유량계수와 비직경과의 관계

centrifugal solidity)를 미끄럼 계수(slip coefficient)와 각 현절비(angular solidity)의 상관관계로 식(3)과 같이 구한다⁽⁶⁾.

$$\sigma_c \equiv \frac{(1 - \frac{D_2}{D_1})N_B}{(2\pi \sin \beta_m)} \quad (3)$$

여기서, $\beta_m = \sin^{-1}[\frac{(\sin \beta_1 + \sin \beta_2)}{2}]$ 이다.

그리고 이를 익렬 해석을 병행한다.

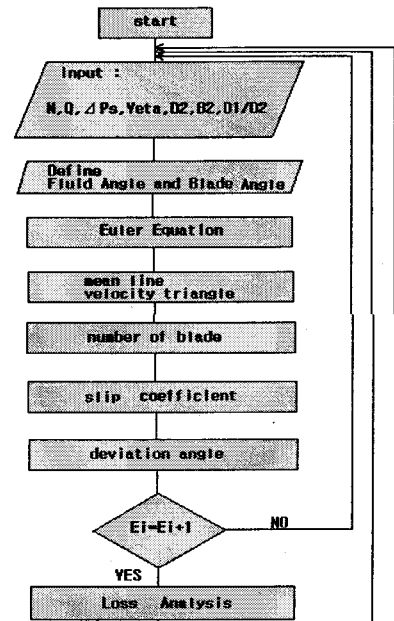
$$i = i_0 + \left(\frac{n_0}{\sigma}\right)\theta \quad (4)$$

여기서 $i_0 = f(\sigma, \beta_1)$, $n_0 = f(\sigma, \beta_1)$, $c = f(\sigma, \beta_1)$ 이다.

$$\delta = \delta_0 + \left(\frac{m_0}{\sigma^b}\right)\theta \quad (5)$$

여기서 $\delta_0 = f(\sigma, \beta_1)$, $m_0 = f(\sigma, \beta_1)$, $b = f(\sigma, \beta_1)$ 이다.

또한, Leiblien의 확산 계수(diffusion factor)를 계산하여 유동박리를 예측할 수 있다⁽⁶⁾. 대개, 원심형인 경우 확산 계수가 0.5나 0.6보다 작아야하며, 이때 미끄럼 계수는 0.8이상인 된다. Fig. 4에는 후향익 원심형 팬의 임펠러 설계의 순서도가 나타나 있다.



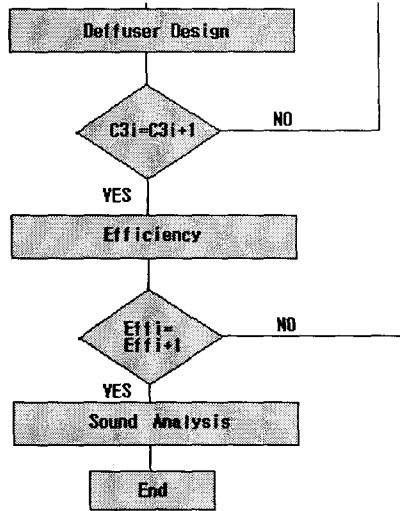


Fig. 4 프로그램 순서도

3. 웬 소음 계산 모델

웬의 소음계산에 있어, LES를 이용하여 직접 소음을 예측하는 것은 현재의 계산능력으로는 상당히 많은 시간이 소요되기 때문에 본 연구에서는 예측된 정상상태의 양력 및 항력을 기초⁽⁸⁾로 다음과 같은 Ffowcs Williams-Hawkings (FW-H)⁽⁹⁾ 방정식을 이용하여 원거리장에서의 정상하중(steady loading)에 의한 음압레벨을 Test 1과 Test 3의 작동점에서 예측 하였다.

$$P_M'(x, t) = \frac{1}{4\pi} \int_{ret} \left[\frac{\rho_o \dot{v}_n}{r^2(1-M_r)^3} \right] ds + \frac{1}{4\pi} \int_{ret} \left[\frac{\rho_o v_n (r \dot{M} \cdot r + c_o M_r - c_o M^2)}{r^2(1-M_r)^3} \right] ds \quad (6)$$

$$P_D'(x, t) = \frac{1}{4\pi c_o} \int_{ret} \left[\frac{\dot{F} \cdot r}{r(1-M_r)^2} \right] ds + \frac{1}{4\pi} \int_{ret} \left[\frac{F_r - \dot{F} \cdot M}{r^2(1-M_r)^2} \right] ds + \frac{1}{4\pi c_o} \int_{ret} \left[\frac{f_r (r \dot{M} \cdot r + c_o M_r - c_o M^2)}{r^2(1-M_r)^3} \right] ds \quad (7)$$

여기서 0°와 180°의 평면은 임펠러의 회전 평면이다. 이 결과로부터 정상하중(steady loading)만을 고려해도 웬의 원거리장 소음은 충분한 정도로 예측됨을 알 수 있다.

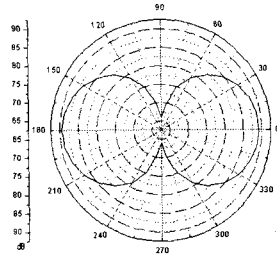


Fig. 5 예측된 후향의 웬의 OASPL 문포

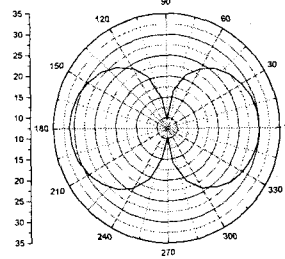


Fig. 6 예측된 전향의 웬의 OASPL 문포

4. 성능 예측 모델

전체 손실은 임펠러 손실, 블류드 손실로 나누어 고려된다. 즉, 임펠러 손실은 입구에서의 충돌손실, 입구와 출구에서의 상대속도 차이에 의한 확산손실, 임펠러 마찰에 의한 손실, 그리고 혼합 손실 등으로 나뉜다.

입구에서의 충돌손실은 다음 식으로 표현된다.

$$\Delta p_1 = \zeta_1 \frac{\rho}{2} (\Delta w_{in} \sin \alpha_1)^2 \quad (8)$$

여기서, $\zeta_1 = 1.0$ 이다.

임펠러의 마찰손실은 입구와 출구에서의 상대속도 차에 의한 확산손실 (Δp_{21})과 임펠러의 마찰에 의한 마찰손실 (Δp_{22})로 구분되어진다.

$$\Delta p_{22} = \zeta_{22} \frac{[2Zcb_m + \pi(r_2^2 - r_1^2)(\rho/2)w_m^3]}{w_1 \sin \beta_1 \pi D_1 b_1} \quad (10)$$

여기서, $\zeta_{21} = 0.1 \sim 0.2$, $\zeta_{22} = 0.004 \sim 0.0045$

$$b_m = \frac{b_1 + b_2}{2}, \quad w_m = \frac{w_1 + w_2}{2} \quad (11)$$

이다.

혼합손실은 주류와 후류가 혼합되면서 생기는 손실로 Yamazaki⁽¹⁰⁾는 (16), (17) 식을 제안하였다.

$$\Delta p_3 = \zeta_3 \frac{\rho}{2} (w_2)^2 \quad (12)$$

$$\zeta_3 = \frac{Zt_{bl}/\pi d_2 \cos(\pi - \beta_2)}{1 - Zt_{bl}/\pi d_2 \cos(\pi - \beta_2)} \quad (13)$$

또한 실제 입구에서의 유동의 방향은 날개각과 일치하지 않으므로 입구에서의 유로 변화가 발생하게 되고 그로 인해 충격손실이 발생하게 된다.

$$\Delta p_4 = \zeta_4 \frac{\rho}{2} u_2^2 \frac{d_1}{d_2} \left[-\frac{Q}{Q_0} - 1 \right]^2 \quad (14)$$

여기서, $\zeta_4 = 0.7 \sim 0.9$ 이다.

볼류트 내의 손실은 Yamazaki⁽¹⁰⁾가 제안한 것과 같이 임펠러를 나온 유체가 볼류트 내를 흐르는 유체와 충돌과 혼합, 마찰로 인해 발생하는 손실을 고려하였다.

$$\Delta p_{s1} = \zeta_{s1} \frac{\rho}{2} c_{m3}^2 \quad (15)$$

여기서, $\zeta_{s1} = 0.7$ 이다.

$$\Delta p_{s2} = \zeta_{s2} \frac{\rho}{2} (c_{m3}^2 - c_{m3}^2) \quad (16)$$

여기서, $\zeta_{s2} = 1.0$ 이다.

$$\Delta p_{s3} = \zeta_{s3} \frac{\rho}{2} c_3^2 \quad (17)$$

$$\zeta_{s3} = \frac{4.08}{\ln(Re^{2.5})} \frac{L_s}{S_\infty} \quad (18)$$

여기서 볼류트의 등가직경 (S_∞)은 원호 (L_s)의 중간위치 ($\theta = 7/4 \pi$)에서의 반경의 두 배로 선택하였다.

$$L_s = \int_{5/4\pi}^{9/4\pi} R_2 e^{\theta \tan \alpha} d\theta \quad (19)$$

$$S_\infty = 2R_2 \frac{(e^{(7/4)\pi \tan \alpha} - 1)W}{R_2(e^{(7/4)\pi \tan \alpha} - 1) + W} \quad (20)$$

위의 손실들을 고려하여 예측된 성능과 실제 시험된 성능 결과는 Fig. 7과 같다. Fig. 7(a)는 Test 1의 예측결과이며, Fig. 7(b)는 Test 2의 예측 결과이다. Fig. 8은 Test3(전향익)의 예측결과이다.

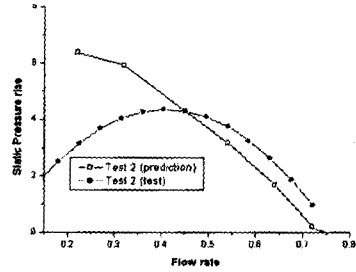


Fig. 7 후향익(Test 2)의 성능예측결과

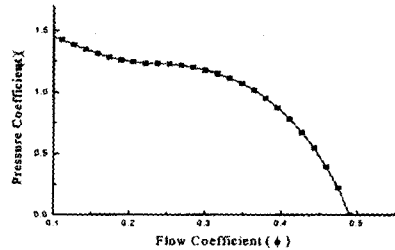


Fig. 8 전향익(Test 3)의 성능예측 결과

5. 결론

역설계 개념을 이용하여, 주어진 회전수에서 유량과 전압을 갖는 팬을 신속히 설계하여 주는 팬설계 프로그램의 원심형 모듈을 개발하였다. 이 프로그램은 설계된 팬의 도면을 작성해주고 여기서 생성된 3차원 형상데이터를 S.L.S. 기체로 전송하면 설계된 팬의 시제품을 며칠 내에 제작 가능케 하여준다. 또한 설계점 및 탈설계점에서의 성능과 소음을 예측하여 제공한다.

본 원심형 팬의 모듈은 실험결과로부터 얻어지는 database 들로부터 보다 정확한 상관식 개발이 가능하도록 설계되어있다.

6. 참고문헌

1. 한국설비기술협회규격, 1999, 후향익 송풍기, KARSE B 0018
2. 한국공업규격, 1993, 다익 송풍기, KSB 6362, pp. 1-19
3. 이승배 등, 2001, "원심 전향익 송풍기 제품규격 KS B 6362의 개정 해설," 유체기계저널 제 4권 제 1호, pp. 46-51
4. Eck, B., 1973, Fans, Pergamon Press
5. 김경호, 박계찬, 이승배, 2000, "시로코 팬 성능 및 공력소음 예측에 관한 연구," 유체기계저널 제 3권 제 4호, pp. 1-8
6. Terry Wright, 1999, Fluid Machinery, CRC Press
7. Yamazaki, S., 1987, "An Experimental Study on the

Aerodynamic Performance of Multi-Blade Blowers (2nd report)," 일본기계학회논문집 B권, 제 53권 485호, pp. 108-113

8. 배일성, 장성욱, 이승배, 2001, "DRL 축류팬 주위의 난류 유동 및 공력소음의 계산," 소음 진동학회 춘계학술대회 논문집 pp. 762-767

9. 김기황, 박준철, 김진화, 이승배, 2001, "축류형 송풍기 저소

음 설계프로그램의 개발 및 평가," 소음진동학회 춘계학술대회 논문집 pp. 967-972

10. Yamazaki, S., 1987, "An Experimental Study on the Aerodynamic Performance of Multi-Blade Blowers (3rd report)," 일본기계학회논문집 B권, 제 53권 490호, pp. 1730-1735