

저소음 원심형 팬의 설계 프로그램

Design Program of Low Noise Centrifugal Fans

박준철* · 손정민** · 김기황** · 이승배***

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

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

ABSTRACT

A centrifugal fan design code was developed and packaged together with **iDesignFan™** as new models. This code generate centrifugal forward curved and backward curved bladed impeller optimally. It also predicts the aerodynamic performance and the overall sound pressure level of the rotating fan by assuming steady blade loading. The overall sound pressure level is used as an input parameter from the third loop of the designing process to acquire the most silent fan for the given aerodynamic performance parameters. With this kind of inverse design concept used in the code, the period of designing a fan is significantly shortened. A centrifugal fan design code, developed in this study and included in **iDesignFan™**, predicts the aerodynamic performance such as design flow rate and static pressure. The aerodynamic performance in the design and off-design conditions is calculated by using the mean line analysis. For the steady loading calculation, the lift force distribution in a blade is used.

1. 서론

원심형 팬은 제작의 용이성과 낮은 비속도와 높은 비직경의 특성으로 인해 시스템의 저항이 상대적으로 큰 산업용뿐만 아니라 냉장

고, 에어컨, 진공청소기 등의 가전제품에도 적용되고 있다. 원심형 팬은 임펠러의 설계 방식에 따라 후향익 송풍기 (KARSE B 0018⁽¹⁾)와 다익 송풍기 (KSB6326⁽²⁾)라고도 불리는 전향익 송풍기로 크게 나누어지며, 용도에 따라 급기팬, 배기팬, 순환팬, 그리고 송압팬으로 구분된다. 최근 제정된 KARSE B 0018과 개정 예정인 KS B 6226에는 임펠러의 깃 바깥 지름이 160mm에서부터 1800mm의 22가지 크기로 구분되어 있다⁽³⁾.

또한 원심형 다익팬의 일종인 시로코 팬

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

** (주)에어로네트

*** 정회원, 인하대학교, 기계공학과

은 전향익 (Forward Curved-Blade)을 가지고 있으며, 후향익보다 상대적으로 낮은 부하에서 소형으로도 많은 유량을 내며 소음이 적어, 낮은 효율에도 불구하고 현재 공조기기, 환기장치, 그리고 주방기기 등에 많이 사용되고 있다. 일반적으로 원심팬 소음저감방법은 cutoff 간격을 증가, 임펠러 깃과 cutoff 가장자리 각도의 조절, 임펠러 깃의 앞쪽에 천이 메쉬의 설치, 임펠러 깃을 비대칭으로 배치 및 팬 볼류트의 변경 등으로 요약된다. 그러나 이러한 소음저감 설계는 원심형 팬의 성능 예측과 동시에 수행되어야 효과적이다. 지금까지의 원심형 팬의 소음 저감은 주로 팬 자체의 설계 방법에 의한 것보다는 주위환경을 바꿈으로써 소음을 줄이는 방법을 주로 고찰하였으며, 설계적 관점보다는 팬의 소음레벨을 평가하는 수준이었다.

일반적으로 원심팬의 성능을 임펠러 내부에서의 마찰이나 유동박리 등에 의한 압력 손실에 의해 영향을 받으며, 이러한 손실은 임펠러 입구와 출구에서의 면적비, 회전속도, 입구와 출구에서의 폭, 날개의 입출구각, 날개의 개수 날개의 형상에 의해 영향을 받는 것으로 알려져 있다⁽⁴⁾. 그러나 시로코 팬의 성능 예측시에는 후향익 원심형 팬과 같은 설계식에 많은 수정이 필요로 하며, 최근에 시로코 팬 특유의 형상과 유동형태를 감안하여 성능 및 공력소음예측이 수행된바 있다⁽⁵⁾.

본 연구에서는 주어진 회전수에서 설계유량과 정압을 갖는 팬의 최적의 형상을 평균유선법을 이용한 역설계와 손실모델을 고려한 성능예측을 수행한다. 또한, 반복 설계과정 중 블레이드의 압력면과 부압면의 압력 차에 의한 이극원 분포를 이용하여 정상하중소음을 예측하여 저소음이 실현되도록 하였다.

원심형 팬의 성능과 관련된 변수들은 회전수(N), 정압(ΔP_s), 유량(Q), 직경(D) 등이 있다. 이러한 성능변수와 밀접한 유속변수로는

입구속도(C_1), 로우터 출구속도(C_2), 볼류트 출구속도(C_3)이며, 팬의 형상과 관련된 변수로는 입구폭(b_1), 출구폭(b_2), 입구 날개각(β_{1b}), 출구 날개각(β_{2b})이 있다. 또한 성능예측을 좀더 정확히 하기 위해서는 유동현상의 양적 상관식이 필요한데, 기대되는 유동 변화각에 못 미치는 각을 고려한 전향각을 정의하여 이상적인 속도 삼각형에서의 이탈(deviation)을 계산하였다. 따라서, 본 연구에는 이들 변수를 조합하여 요구되는 성능과 소음을 예측하도록 한다. 또한, 입력과정이나 출력과정에서 Visual C++의 MFC를 이용하여 window를 디자인 하였으며, 출력에서 입력값을 다시 유도하는 역설계 개념을 도입하였다.

2. 공기역학적 설계 방법

2.1 전향익 팬의 설계

원심형 다익팬의 일종인 시로코 팬은 전향익(forward curved blade)을 가지고 있으며, 상대적으로 낮은 부하에서 소형으로도 많은 유량을 낼 수 있다. 또한 동일 유량에서 축류형 팬이나 후향익(forward curved blade) 원심형 팬보다 소음이 낮아, 낮은 효율에도 불구하고 현재 공조기기, 환기장치, 주방기기 등에 널리 사용되어지고 있다.

2.1.1. 임펠러의 설계

본 연구에서 개발한 프로그램의 계산순서는 다음과 같다: 먼저 날개 입구각(β_1)과 최적 입구폭(b_1), 최적 입구 직경(D_1)을 결정한 후에 누설유량을 고려하여 출구 속도(C_{m2})를 결정한다. 이를 바탕으로 미끄럼계수를 출구날개각(β_2)과 실험식을 이용하여 결정하게 된다. 위의

과정 중에 누설유량과 출구날개각에 의해 미끄럼 계수가 결정되어지는데, 이는 같은 효율과 성능을 내도록 설계변수들을 조절하여 반복 계산하게 된다.

날개 두께를 고려하여 날개 입구각을 결정하며, 날개의 두께를 고려하면 반경방향 속도(C_{1M})가 두께를 고려하지 않은 경우의 반경방향 속도(C_{1M0})보다 증가하게 된다. 그리고, 최적 입구폭을 결정할 때는 가속을 고려하여 입구에서의 급격한 유동방향의 변화에 의한 박리(separation)를 줄이는 후향익 환과는 달리 전향익 환의 경우에는 큰 폭의 면적증가(약 2:1)를 통한 감속으로 박리를 감소시키기 때문에 이를 고려하여 최적 입구폭을 결정하게 된다. 임펠러 출구에서의 유동은 반경방향 속도가 큰 영역과 그에 비해 출구 속도가 작은 영역이 발생하게 되며, 측판과 흡입구 사이에서의 누설이 발생하므로 이를 고려하여 출구 속도를 계산하였다.

또한 속도삼각형에서 날개수가 무한개일 때에는 출구 유동이 날개의 출구각도를 따라 흐르나 실제 송풍기에서는 날개수가 유한하고 날개간의 이차유동에 의해 출구 유동이 날개를 따라서 흐르지 못하게 된다. 이러한 동력전달 손실을 보완하는 미끄럼 계수는 뒷굽음깃 원심 환과 원심압축기에 대해서 많은 식들이 나와 있으나, 날개 출구각(β_2)이 90° 보다 훨씬 큰 시로코 환에는 적합하지 못하다⁽⁵⁾. 여기에서는 Yamazaki(1987)⁽⁶⁾가 제시한 미끄럼계수식을 사용하였다. 이와 같은 방법으로 입력 설계변수가 아래 Table 1의 Test 3으로 주어진 경우에 대해 설계된 임펠러 및 볼류트의 형상은 Fig. 1과 같다.

	유량(CCM)	정압 [mmAq]	직경(mm)	회전수 (rpm)	비 고
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

Table. 1 설계 입력값

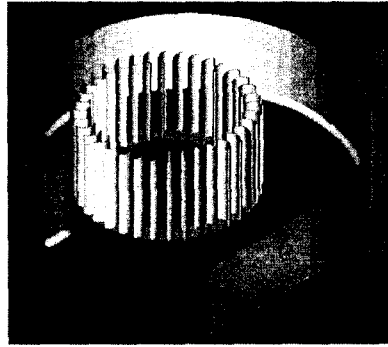


Fig. 1 설계된 전향익 임펠러의 형상

2.1.2. 볼류트의 설계

스크롤은 임펠러로부터 나온 공기를 모으는 곳인 동시에 스크롤로 나온 공기의 동압을 정압으로 변환시켜 주는 곳이기도 하다. 따라서 스크롤로 들어오는 공기의 손실이 최소가 되도록 설계한다. 스크롤 설계에 사용되는 식은 자유와동이론에 기초하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$r = r_3 \exp(\theta \cdot \tan \alpha_s) \quad (1)$$

그러나, 본 연구에서는 볼류트를 네 영역으로 나누어 손실이 최소화되며 정압상승이 일어나도록 설계하였다. 이와 같은 방법으로 입력 설계변수가 Table 1의 Test 3으로 주어진 경우에 대해 설계된 임펠러 및 볼류트의 형상은 Fig. 2와 같다.

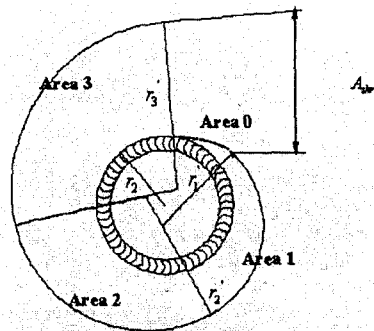


Fig. 2 볼류트의 형상

2.2 후향익 현의 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, 블류트등의 설계변수들이 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.

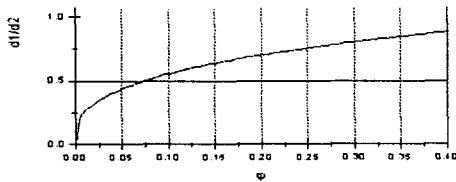


Fig. 3 유량계수(ϕ)와 비직경($\frac{D_1}{D_2}$)의 상관관계

평균유선에서의 속도삼각형이 구해지면 입구와 출구의 날개각과 비직경으로 인하여 날개 개수가 구해진다. 이때 구해진 날개 개수로 다

시 미끄럼 계수를 구하며, 이를 반복하여 적당한 미끄럼 계수와 날개 개수를 구한다. 그리고 이탈각을 계산할 때 후향익 원심형에서는 원심형 현질비(approximate centrifugal solidity)를 미끄럼 계수(slip coefficient)와 각 현질비(angular solidity)의 상관관계로 식(2)과 같이 구한다⁽⁷⁾.

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

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

그리고 이를 익렬 해석을 병행한다.

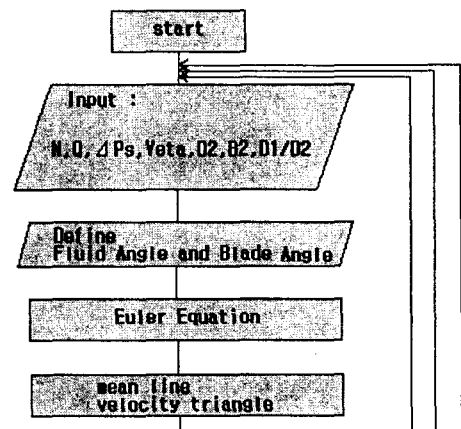
$$i = i_0 + \left(\frac{n_0}{\sigma_c}\right)\theta \quad (3)$$

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

$$\delta = \delta_0 + \left(\frac{m_0}{\sigma_b}\right)\theta \quad (4)$$

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⁽⁷⁾. 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.



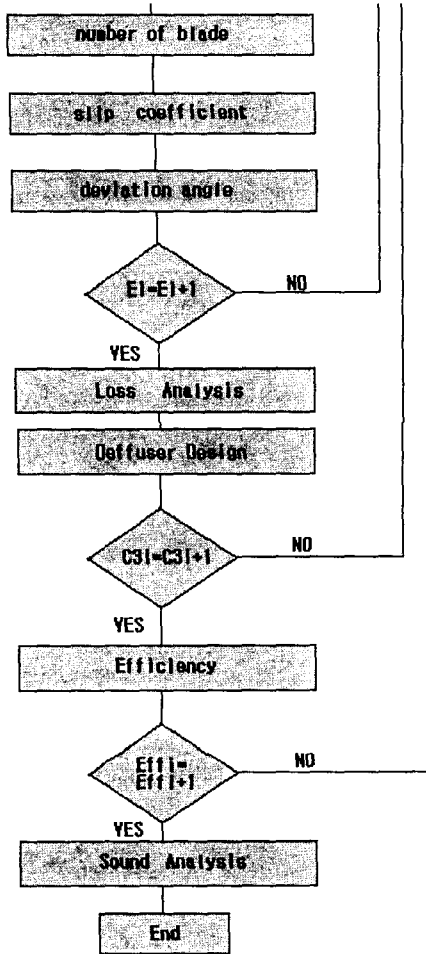


Fig. 4 프로그램 순서도

위의 과정들을 거쳐 선택된 입력변수들 중 Table 1에 나타난 Test 1의 경우에 대해 최종적으로 설계된 임펠러의 형상은 다음의 Fig. 5과 같다.



Fig. 5 설계된 후향의 임펠러의 형상

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 - Hawkins (FW-H)⁽⁹⁾ 방정식을 이용하여 원거리장에서의 정상하중(steady loading)에 의한 음압레벨을 Test 1의 작동점에서 예측하였다.

$$P_M'(x, t) = \frac{1}{4\pi} \int_{f=0} \left[\frac{\rho_o v_n}{r^2(1-M_r)^3} \right]_{ret} ds + \frac{1}{4\pi} \int_{f=0} \left[\frac{\rho_o v_n (r M_r \dot{x} + c_o M_r - c_o M^2)}{r^2(1-M_r)^3} \right]_{ret} ds \quad (5)$$

$$P_D'(x, t) = \frac{1}{4\pi c_o} \int_{f=0} \left[\frac{F_r \cdot r}{r(1-M_r)^2} \right]_{ret} ds + \frac{1}{4\pi} \int_{f=0} \left[\frac{F_r - F \cdot M}{r^2(1-M_r)^2} \right]_{ret} ds + \frac{1}{4\pi c_o} \int_{f=0} \left[\frac{f_r (r M_r \dot{x} + c_o M_r - c_o M^2)}{r^2(1-M_r)^3} \right]_{ret} ds \quad (6)$$

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.

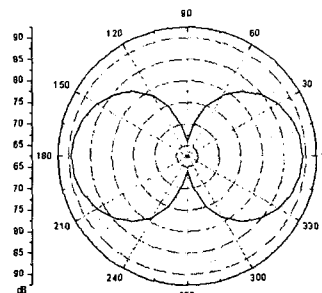


Fig. 6 예측된 OASPL 분포

4. 성능 예측 모델

전체 손실은 임펠러 손실, 볼류트 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.

$$\Delta p_1 = \zeta_1 \frac{\rho}{2} (\Delta w_{u1} \sin \alpha_1)^2 \quad (7)$$

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.

$$\Delta p_{21} = \zeta_{21} \frac{\rho}{2} [w_1^2 - w_2^2] \quad (8)$$

$$\Delta p_{22} = \zeta_{22} \frac{[2Zc b_m + \pi (r_2^2 - r_1^2) (\rho/2) w_m^3]}{w_1 \sin \beta_1 \pi D_1 b_1} \quad (9)$$

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

$$b_m = \frac{b_1 + b_2}{2}, w_m = \frac{w_1 + w_2}{2} \text{ 이다.}$$

혼합손실은 주류와 후류가 혼합되면서 생기는 손실로 Yamazaki는 (16), (17) 식을 제안하였다.

$$\Delta p_3 = \zeta_3 \frac{\rho}{2} (w_2')^2 \quad (10)$$

$$\zeta_3 = \frac{Zt_B / \pi d_2 \cos(\pi - \beta_2)}{1 - Zt_B / \pi d_2 \cos(\pi - \beta_2)} \quad (11)$$

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

$$\Delta p_4 = \zeta_4 \frac{\rho}{2} u_2^2 \frac{d_1}{d_2} \left[\frac{Q}{Q_0} - 1 \right]^2 \quad (12)$$

여기서, $\zeta_4 = 0.7 \sim 0.9$ 이다.

볼류트 내의 손실은 Yamazaki가 제안한 것과 같이 임펠러를 나온 유체가 볼류트 내를 흐르는 유체와 충돌과 혼합, 마찰로 인해 발생하는 손실을 고려하였다.

$$\Delta p_{51} = \zeta_{51} \frac{\rho}{2} c_{m3}^2 \quad (13)$$

여기서, $\zeta_{51} = 0.7$ 이다.

$$\Delta p_{52} = \zeta_{52} \frac{\rho}{2} (c_{u3}^2 - c_{u3}'^2) \quad (14)$$

여기서, $\zeta_{52} = 1.0$ 이다.

$$\Delta p_{53} = \zeta_{53} \frac{\rho}{2} c_3^2 \quad (15)$$

여기서, $\zeta_{53} = \frac{4.08}{\ln(Re^{2.5})} \frac{L_s}{S_{es}}$ 이다.

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

$$L_s = \int_{5/4\pi}^{9/4\pi} R_2 e^{\theta \alpha} n \alpha d\theta \quad (16)$$

$$S_{es} = 2R_2 \frac{(e^{(7/4)\pi \tan \alpha} - 1) W}{R_2 (e^{(7/4)\pi \tan \alpha} - 1) + W} \quad (17)$$

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.

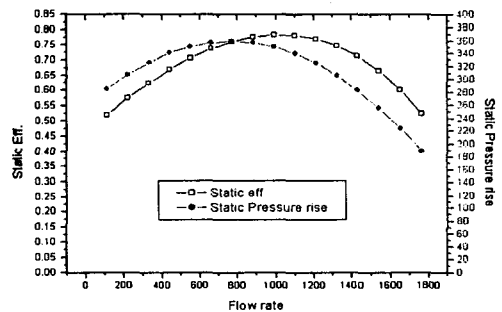


Fig. 7 (a) Test 1의 성능예측 결과

참고문헌

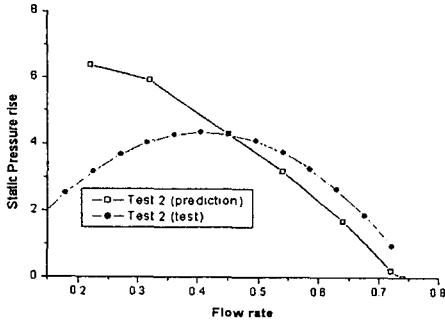


Fig. 7 (b) Test 2의 성능예측과 시험결과

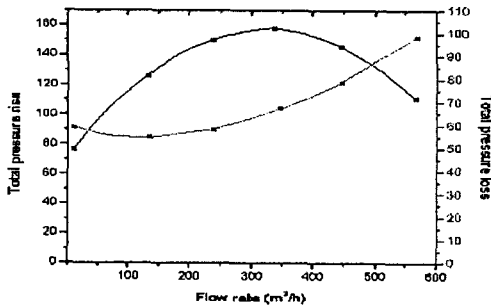


Fig. 8 Test 3(후향익)의 성능예측 결과

5. 결론

역설계 개념을 이용하여, 주어진 회전수에
서 유량과 전압을 갖는 팬을 신속히 설계하여
주는 원심형 팬설계 프로그램인 **zDesignFan™**
의 원심형 모듈을 개발하였다. 이 프로그램은
설계된 팬의 도면을 작성해주고 여기서 생성된
3차원 형상데이터를 S.L.S. 기계로 전송하면
설계된 팬의 시제품을 며칠내에 제작가능케 하
여준다. 또한 설계점 및 탈설계점에서의 성능
과 소음을 예측하여 제공한다.

본 원심형 팬의 모듈은 실험결과로부터
얻어지는 database들로부터 보다 정확한 상관
식 개발이 가능하도록 설계되어있다.

1. 한국설비기술협회규격, 1999, 후향익 송풍기, KARSE B 0018
2. 한국공업규격, 1993, 다익 송풍기, KSB 6362, pp. 1-19
3. 이승배 등, 2001, "원심 전향의 송풍기 제품 규격 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 환 성능 및 공력소음 예측에 관한 연구," 유체기계저널 제 3권 제 4호, pp. 1-8
6. Yamazaki, S., 1987, "An Experimental Study on the Aerodynamic Performance of Multi-Blade Blowers (2nd report)," 일본기계학회논문집 B권, 제 53권 485호, pp. 108-113
7. Terry Wright, 1999, Fluid Machinery, CRC Press
8. 배일성, 장성욱, 이승배, 2001, "DRL 축류팬 주위의 난류 유동 및 공력소음의 계산," 소음진동학회 춘계학술대회 논문집 pp. 762-767
9. 김기황, 박준철, 김진화, 이승배, 2001, "축류형 송풍기 저소음 설계프로그램의 개발 및 평가," 소음진동학회 춘계학술대회 논문집 pp. 967-972