

## 축류송풍기의 설계시 적용된 와류형식의 영향에 관한 실험적 연구

조수용\* · 최범석\*\* · 오종학\*\*\*

### An Experimental Study on the Effect of Vortex-Type Applied to Design an Axial Flow Fan

Soo-Yong Cho\*, Bum-Seog Choi\*\*, Jong-Hak Oh\*\*\*

*Key Words: Axial Flow Fan (축류송풍기), Free Vortex Method (자유와류법), Forced Vortex Method (강제와류법), Aerodynamic Design (공력설계)*

#### ABSTRACT

The flow angle at the inlet and exit of a rotor or stator is an important design parameter involved in the design a fan blade. Flow angles along the radial direction for 3-D stacking are calculated using two kinds of vortex methods, i.e. free vortex method and forced vortex method. The performance test shows that a fan designed by the free vortex method is more efficient than a fan designed by the forced vortex method. As a reference, an imported fan is tested. Even though the straightner of the imported fan is used for the comparison test, the difference of efficiency between the imported fan and the fan designed by the free vortex method is negligible. The noise of the fan designed by the free vortex method is less than that of the imported fan. A bellmouth installed at the fan inlet improved the fan efficiency more than 10 %.

#### 1. 서 론

송풍기가 이용되어지는 분야는 일반 산업기계, 빌딩, 선박 등 이루 열거할 수 없을 정도로 많이 이용되고 있다. 사용하고자 하는 송풍기의 형태는 사용 목적에 따라 유량과 압력 및 회전수에 의하여 정하여지는 비속도의 관계에 의하여 결정되어진다. 축류송풍기는 고 풍량, 저 풍압의 목적에 사용되어지며 대단위 공장이나 지하철 등의 대형 송풍장치 뿐만 아니라 전

자제품의 냉각장치 등에도 사용되어지고 있다. 송풍기의 설계 및 제작기술은 선진국에서는 이미 1940-50년대에 이론을 체계화하고 실험에 의하여 방대한 양의 설계기술 자료를 확보하여 고 효율, 저 소음, 저 진동의 송풍기를 생산하고 있다. 하지만 대부분의 국내 생산업체에서는 선진국가들의 업체들로 부터 면허생산 및 기술도입에 의하여 양산을 하고 있는 실정이다<sup>(1)</sup>.

송풍기의 설계는 여러 설계변수가 관련이 되어 있으므로 완벽한 송풍기의 개발을 위하여서는 각각의 설계 변수에 따라 실험을 하여야 한다. 송풍기의 기본형상은 평균반경 해석을 통하여 얻게되지만 가장 핵심부품인 익형의 설계는 정익과 동익의 입출구에서의 유동각을 알아야 한다. 또한 3차원으로 익형을 설계하기

\* 경상대 항공기계공학부(항공기부품연구센터)

\*\* 한국기계연구원 열유체환경연구부

\*\*\* 충남대학교 기계공학과 대학원

위하여서는 반경방향을 따라 유동각의 분포를 알아야 하므로 유동각은 익형 설계시 가장 중요한 설계변수가 된다. 반경방향을 따라서 원주방향의 속도분포를 자유와류 분포와 강제와류 분포로 가정하여 반경방향 평형 방정식에서 축방향 속도를 구하여 유동각을 정할 수 있다. 하지만 강제와류 분포의 가정은 와류의 세기를 알 수 없으므로 설계시 많이 적용되어지는 않지만 최근에는 송풍기를 역회전시켜 흡배기용으로 활용하는 사례가 많으므로 이를 적용하고 있다.

본 연구에서는 소형선박의 엔진룸 환기 등에 사용되는 축류형 송풍기를 국산화하기 위한 목적으로 설계, 제작, 성능시험의 과정에 의하여 설계변수가 성능에 미치는 영향에 관하여 연구를 수행하고자 하였다. 자유와류법의 가정에 의하여 설계되어진 송풍기와 강제와류법의 가정에 의하여 설계되어진 송풍기의 설계점에서의 성능시험 뿐만 아니라 동익의 스테이지 각도를 변경하면서 성능시험을 수행하였다. 또한 동급의 선진국에서 수입되어지는 송풍기와 성능비교를 위하여 수입 송풍기의 성능시험도 수행하여 결과를 비교하였다.

## 2. 송풍기 설계기술

### 2.1 요구사항과 설계변수

송풍기의 설계를 위한 가장 기본이 되는 무차원의 변수는 선회계수( $\epsilon$ )와 유량계수( $\lambda$ )이다.

$$\epsilon = \frac{C_\theta}{C_x} \quad (1)$$

$$\lambda = \frac{\overline{C_x}}{\Omega r} \quad (2)$$

C는 절대 속도를 나타내며 하첨자 x와  $\theta$ 는 축방향과 원주방향을 나타낸다. 축방향의 속도는 익형의 허브에서 팁부분까지 반경방향을 따라 균일하지 않을 수 있으므로 송풍기의 유로면적을 기준으로 반경방향으로 변하는 축방향 속도의 평균값을  $\overline{C_x}$ 에 의하여 식 (1)과 (2)에 표현하였다.  $\Omega$ 는 송풍기의 회전수를 의미한다. 따라서 요구하는 유량(Q)와 평균적인 전압력 상승은 유량계수와 선회계수의 무차원 변수로 표현 가능하다. 유량은 축방향 속도( $C_x$ )와 직접적인 관계가 있으므로 유량계수에 비례하게 되며 전압력 상승은 선회계

수와 유량계수의 함수로 나타난다.

송풍기의 동익에 의한 이론적인 전압력 상승과 모터에 의하여 동익에 전달되어지는 전달력과의 관계식으로부터 전압력의 상승을 동압에 의하여 무차원화를 하면 아래와 같이 나타난다.

$$K_h = \frac{\Delta h_h}{\frac{1}{2} \rho C_x^2} = \frac{\Delta h_h}{\frac{1}{2} \rho \overline{C_x}^2 \eta_{bl}} = \frac{2}{\lambda} (\epsilon_2 - \epsilon_1) \quad (3)$$

식 (3)에서의 하첨자 1 과 2는 동익 전후를 나타내며  $\eta_{bl}$ 은 동익에 의한 변화를 의미한다.  $\eta$ 는 효율을 의미하며 주어진 유량과 전압력 상승을 얻기 위하여서는 선회계수와 유량계수를 적절히 선정하여야 함을 알 수 있다. 하지만 설계를 위한 무차원 변수의 값을 선정하기 위하여서는 송풍기의 내부를 지나는 작동공기의 물리량을 알아야 한다. 이를 위하여 3차원 운동량 방정식을 해석하여야 하나 이러한 방법을 형상을 설계하기 위한 초기 설계시 에 적용하기에는 많은 시간이 요구되므로 실제 적용에는 반경방향으로의 흐름은 단순화된 운동량 방정식을 사용한다.

### 2.2 평균반경해석

평균반경 해석에서는 최적의 효율을 얻을 수 있는 보스비 및 동익의 효율을 구하게 된다. 보스비는 케이싱의 반경과 허브 반경의 비를 의미하며 간단하게는 실험적으로 구하여진 Cordier 곡선을 이용하여 송풍기의 보스비를 선정할 수 있는 방법이 사용되기도 한다<sup>(2)</sup>. 본 연구에서는 주어진 익형의 형상으로 동익, 정익, 덕트에서의 손실에 대한 여러 실험 데이터를 이용하여 이를 구하도록 한다. 주어진 설계조건인 유량(Q), 전압력 상승( $\Delta P_t$ ) 및 제한조건인 회전수(rpm)를 기준으로 하여 외경을 정하고 여러 보스비에 대하여 최적의 보스비를 찾는다. 필요에 따라서는 내경을 고정하고 케이싱을 변경하여야 하는 경우에도 최적의 보스비를 찾을 수 있도록 하였다. 축방향 속도와 이론적인 전압력 상승( $K_h$ )을 계산하고 평균반경에서 유량계수와 선회계수를 계산한다. 실험데이터로부터 동익에서의 손실( $K_R/K_h$ )과 정익에서의 손실( $K_S/K_h$ )을 계산하여 익형의 효율을 계산한다.

$$\eta_{bl} = 1 - (K_R + K_S)/K_h \quad (4)$$

앞서 가정한 익형의 효율과 일치되어질 때까지 반복하여 계산하며 최적의 보스비는 송풍기 시스템의 효율이 가장 높을 때의 값으로 선정한다. 이러한 과정에서 익형에 따른 손실의 데이터를 확보하여야 하는 어려움이 있으나 초기의 과정에서는 기존의 실험 결과를 이용하는 방법이나 여러 결과를 이용하여 단순히 식 (3)으로 나타낸 결과를 참고 할 수 있다.

### 2.3 3차원 유동과 와류형식의 결정

평균반경에서 속도 삼각형은 쉽게 결정할 수 있으나 반경방향으로의 속도는 운동량 방정식을 단순화하여 얻게된다. 즉 아래와 같이 반경방향 평형방정식을 사용한다.

$$\frac{dh}{dr} = C_x \frac{dC_x}{dr} + C_\theta \frac{dC_\theta}{dr} + \frac{C_\theta^2}{r} \quad (5)$$

상기의 반경방향 평형방정식을 만족하는 와류형식에 관하여 Horlock<sup>(4)</sup>이 정리하여 놓았다. 식 (5)를 풀기 위하여 자유와류법에 의하여 해석하는 방법과 강제와류법에 의하여 해결하는 방법, 일정 반동형, 지수형 및 반경 평형을 무시하는 경우가 있을 수 있다. 본 연구에서는 반경방향으로 일정 와류를 갖는다고 가정한 자유와류법과 반경방향으로 직선적으로 변한다고 가정한 강제와류법을 이용하여 설계를 한다. 자유와류법의 경우는 반경방향으로의 축방향 속도와 에너지가 일정하다고 가정하므로 반경방향 평형방정식은  $rC_\theta$ 가 일정한 값을 갖도록 변경되어진다. 내부유동이  $rC_\theta$ 가 일정하지 않은 강제와류에 의하여 유동이 형성된다면 식 (5)의 반경방향 평형방정식은 식 (6)과 같이 변형되어진다.

$$C_r \frac{dC_r}{dr} + C_x \frac{dC_x}{dx} - \frac{C_\theta^2}{r} = -\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dr} \quad (6)$$

$$\frac{\overline{\varepsilon_2}}{C_x} = \frac{C_{\theta 2}}{C_x} = a + b \zeta \quad (\zeta = \frac{r}{R}) \quad (7)$$

강제 와류의 관계식으로부터 출구에서의 선회 계수는 직선적으로 변화는 관계식으로 나타낼 수 있다. 하지만 축방향의 속도가 반경방향으로 일정하지 않으므로 동익의 입구에서의 축방향의 속도는 송풍기의 면적

을 기준으로 반경방향의 평균 속도를 적용하며 동익의 출구와 정익의 출구에서의 속도분포는 식(9)와 식(10)의 계산식에 의하여 구할 수 있다.

$$C_{x1} = \overline{C_x} \quad (8)$$

$$\left(\frac{C_{x2}}{C_x}\right)^2 = \left(\frac{C_{x1}}{C_x}\right)^2 + \overline{\varepsilon_2} \left(-\overline{\varepsilon_2} + \frac{2}{\lambda}\right) - \left[\overline{\varepsilon_2} \left(-\overline{\varepsilon_2} + \frac{2}{\lambda}\right)\right]_{\xi_m} - 2 \int_{\xi_m}^{\xi} \frac{\overline{\varepsilon_2}}{\varepsilon_2^2} \frac{d\xi}{\xi} \quad (9)$$

$$\left(\frac{C_{x3}}{C_x}\right)^2 = \left(\frac{C_{x2}}{C_x}\right)^2 + 2 \int_{\xi_m}^{\xi} \frac{\overline{\varepsilon_2}}{\varepsilon_2^2} \frac{d\xi}{\xi} + \frac{\overline{\varepsilon_2}}{\varepsilon_2^2} - \left[\frac{\overline{\varepsilon_2}}{\varepsilon_2^2}\right]_{\xi_m} \quad (10)$$

하지만 식 (7)에서 가정한 선회계수의 직선적인 변화를 위한 상수 a 와 b는 다음의 관계를 만족하도록 설정하여야 한다. 우선 송풍기의 설계 요구조건인 평균 전압력 상승을 만족하도록 정하여야 하며 또한 식 (11)의 설계한계점(design limitation)을 만족하도록 설정하여야 한다.

$$\frac{2}{\lambda} \left[ \overline{\varepsilon_{2,t}} - \xi_h \left( \overline{\varepsilon_{2,h}} \right) \right] < 1.5 \quad (11)$$

이상으로 계산되어진 상수 a=0.509 와 b=-0.05에 의하여 동익의 입구에서의 상대 유동각( $\beta_1$ )과 출구에서의 상대 유동각( $\beta_2$ )의 값은 아래와 같이 구하여 진다.

$$\tan \beta_1 = \frac{\Omega r}{C_{x1}} = \frac{\Omega r}{C_x \left(\frac{C_{x1}}{C_x}\right)} = \frac{1}{\lambda \left(\frac{C_{x1}}{C_x}\right)} \quad (12)$$

$$\tan \beta_2 = \frac{\Omega r - C_{\theta 2}}{C_{x2}} = \frac{\frac{1}{\lambda} - \overline{\varepsilon_2}}{\left(\frac{C_{x2}}{C_x}\right)} \quad (13)$$

### 2.4 형상변수

반경방향을 따라 정하여진 설계변수로부터 3차원 익형의 설계는 우선 동익 입출구에서의 상대 유동각을 계산한다. 형상비에 의하여 날개수를 결정하고 익

형의 부하계수( $C_L$ )를 계산한다. 계산되어진 부하계수에서 양력계수와 현절비(solidity)를 결정하여야 하는데 실험데이터에 의하여 최적의 현절비를 선정하는 방법이 있으며 케스케이드(cascade) 이론에 의하여 양력계수를 선정하는 방법, 코드길이에 따라 양력계수를 조절하는 방법이 있다. 송풍기의 속도에 따라 반경방향을 따라 코드길이를 조절하여 현절비를 선정하는 방법을 채택하기도 있다. 양력계수는 현절비로부터 케스케이드나 독립된 에어포일 방법<sup>(5)</sup>을 적용하여 익형을 설계한다. 하지만 독립된 에어포일의 방법을 사용하는 경우에는 주위의 익형에 의한 간섭의 영향을 고려하여야 한다.

응력계산에 의하여 익형의 두께를 결정하고 스테거(stagger)각( $\xi$ )을 결정하여야 한다. 우선 임의의 스테거각을 가정하고 현절비에 따라 편이각( $\delta$ )과 캠버각( $\theta$ ), 입사각( $\alpha$ )을 결정하여 가정하였던 스테거각이 수렴하게 될 때까지 계산을 수행한다. 편이각에 대한 관계식은 Wallis<sup>(6)</sup>에 의하여 제안된 식을 사용하였다.

$$\delta = m \theta \sqrt{s/c} \tag{14}$$

$$\theta = \frac{(\beta_1 - \beta_2) - \alpha}{1 - m \sqrt{\frac{s}{c}}} \tag{15}$$

$$\xi = (\beta_1 - \alpha) - \frac{\theta}{2} \tag{16}$$

본 연구에서는 독립된 에어포일 방법을 사용하여 익형의 간섭효과를 고려하여 양력의 값을 조절하였으며 설계되어진 익형의 확산계수가 0.6 이하가 되도록 설계하였다.

### 3. 익형설계 및 성능시험

#### 3.1 익형설계

설계조건으로 유량  $150 \text{ m}^3/\text{min}$ 과 전압력 상승을 306 Pa로 정하였으며 회전수는 사용할 모터의 조건에 따라 1737 RPM의 제한조건으로 설계를 하였다. 최적의 보스비는 평균반경 해석에 의하여 0.48이었으나 시험장착 조건 때문에 0.45로 선정하였다. Table 1과 2는 자유와류법과 강제와류법에 의하여 설계되어진 익형의 형상변수로 반경방향을 따라서 양력계수( $C_L$ ), 현절비

( $\sigma$ ), 스테거각( $\xi$ ), 코드길이(c), 입구유동각( $\beta_1$ ), 출구유동각( $\beta_2$ )을 나타내고 있으며 코드길이의 단위는 mm이다. 따라서 양력계수를 만족할 수 있는 형상에서 입출구

Table 1 Profile parameters by the free vortex

r/R	$C_L$	$\sigma$	$\xi$	c	$\beta_1$	$\beta_2$
0.45	1.40	0.91	27.18	80.5	50.68	22.93
0.52	1.35	0.79	36.40	80.5	54.60	35.58
0.59	1.09	0.69	44.05	80.0	57.89	44.50
0.66	0.98	0.62	49.30	80.0	60.68	50.96
0.73	0.89	0.56	53.58	79.5	63.05	55.80
0.79	0.82	0.51	57.06	79.0	65.09	59.55
0.86	0.76	0.47	59.94	79.0	66.86	62.53
0.93	0.71	0.43	62.45	78.5	68.40	64.96
1.00	0.66	0.40	64.60	78.0	69.76	66.98

Table 2 Profile parameters by the forced vortex

r/R	$C_L$	$\sigma$	$\xi$	c	$\beta_1$	$\beta_2$
0.45	1.01	0.92	42.35	81.0	50.68	42.97
0.52	0.90	0.79	46.97	81.0	54.60	48.31
0.59	0.85	0.70	50.33	80.5	57.89	52.00
0.66	0.85	0.62	52.74	80.0	60.68	54.72
0.73	0.86	0.56	54.60	80.0	63.05	56.85
0.79	0.86	0.51	56.07	79.5	65.09	58.57
0.86	0.86	0.47	57.24	79.5	66.86	60.02
0.93	0.85	0.43	58.29	79.0	68.40	61.25
1.00	0.85	0.40	58.72	78.0	69.76	62.33

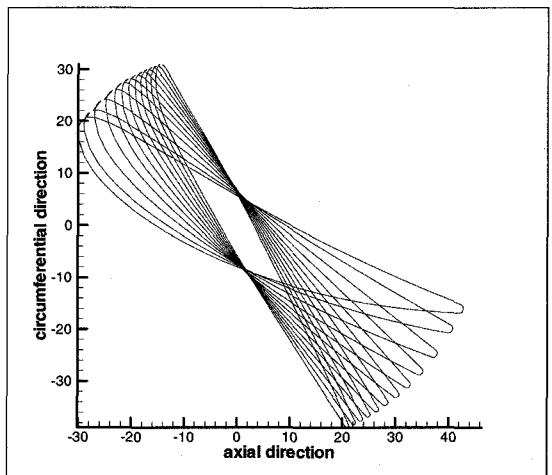


Fig. 1 Blade profile with free vortex method

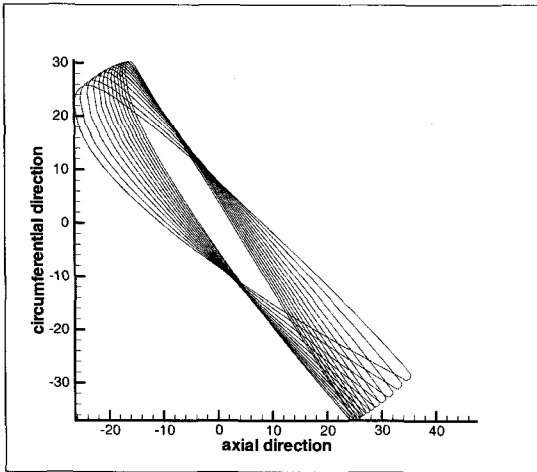


Fig. 2 Blade profile with forced vortex method

유동각을 고려하여 3차원 익형의 형상을 설계하였다. 익형은 적용 가능한 데이터가 많이 있으며 현재 많이 사용되고 있는 F-Series 익형을 사용하였으며 입사각의 효과를 미리 주기 위하여 2%의 Droop를 사용하였다.

Fig. 1은 자유와류법에 의하여 설계된 익형의 형상을 나타내고 있으며 Fig. 2는 강제와류에 의하여 설계된 익형의 3차원 형상을 나타내고 있다. 자유와류법에 의하여 형성된 익형은 허브에서 유동각의 변화가 크게 나타나 있으므로 팁 부분에 비하여 부하계수가 상당히 크게 나타난다. 뿐만 아니라 반경방향으로의 비틀림이 강제와류법에 의하여 설계된 익형에 비하여 크게 비틀려 있음을 알 수 있다.

### 3.2 실험장치

성능시험은 KS B 6311<sup>(7)</sup>의 송풍기 성능시험을 기준으로 수행하였으며 소음의 측정에는 KS B 6361<sup>(8)</sup>을 기

준으로 수행하였다. 정확한 입력 동력을 얻기 위하여 모터와 송풍기 동익 사이에 토크메타를 설치하였다. 토크메타는 Eaton 1804-500을 사용하였으며 토크지시계는 7540-115를 사용하였다.

일반적인 송풍기의 장착 형태는 동-정익-모터로 배열되어 모터가 송풍기의 덕트 내부에 설치되나 토크메타의 설치로 인하여 모터를 동익의 앞부분에 설치하고 토크메타를 동익과 모터 사이에 설치하였다. 축류송풍기의 성능실험을 위한 이러한 구조에서는 동익과 토크메타와의 거리가 짧게 되면 송풍기의 흡입구를 일부분 차단하게 되어 유로의 형성에 나쁜 영향을 주게 된다. 그러므로 측정의 결과는 실제효율 보다도 나쁜 결과를 얻게되는 문제점이 있다<sup>(9)</sup>. 본 연구에서는 토크메타의 설치에 의하여 송풍기의 흡입에 지장이 없도록 동익과 토크메타와의 거리를 송풍기 케이싱 직경 이상의 여유 있는 거리를 유지하였다.

Fig. 3은 성능 실험장치의 배치도를 보여주고 있다. 동압의 측정에는 90°간격으로 설치된 4개의 피토티브를 반경방향으로 이송하며 20개의 측정점으로부터 스캐너밸브를 통하여 마이크로 마노메타(FCO14)에 의하여 측정하였으며 또한 온도, 습도, 정압을 측정하여 표준상태로 환산하였다. 송풍기의 흡입성능을 향상하기 위하여 벨로우즈<sup>(10)</sup>를 입구부에 설치하여 성능을 비교하였다. 설치한 벨로우즈는 입출구의 면적비가  $A_1/A_0=2.25$  이며, 길이는 케이싱의 직경에 비하여  $x/D=0.304$  이다. 외면의 곡면 형상은 반경이  $r/D=0.2, 0.33$  인 두 곡선의 조합으로 형상화 되었다. 소음측정은 암소음이 40 dBA 인  $w 20 \times l 20 \times h 12$  m의 실내에서 Rion, NA-24를 사용하여 측정하였다. 소음 측정 시 축류팬과 마이크로폰과의 수평거리는 1 m였으며 기타 공간상의 위치는 KS B 6361<sup>(8)</sup>을 기준으로 소음측정을 수행하였다.

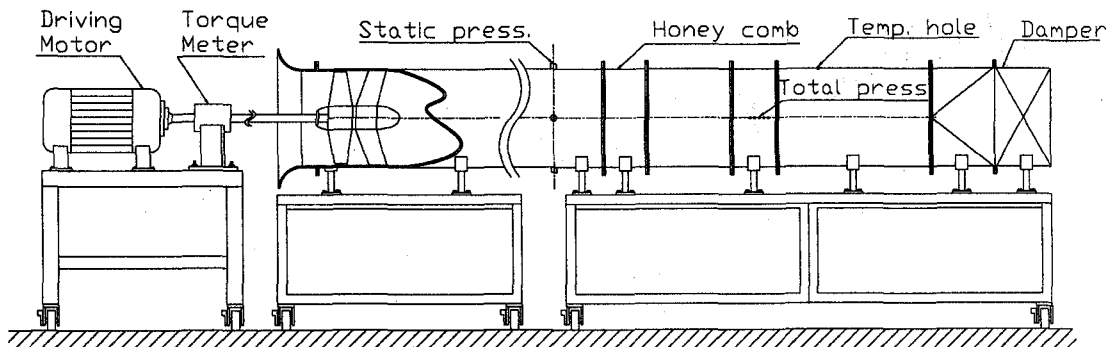


Fig. 3 Layout of fan test rig

### 4. 결과 및 검토

자유와류법에 의하여 제작된 송풍기의 성능 결과를 소요동력과 함께 Fig. 4 에서 보여주고 있다. 유량이 150 m<sup>3</sup>/min에서 전압력의 상승이 260 Pa을 나타내고 있는데 이는 설계 예상치인 306 Pa 보다는 낮은 값을 나타내고 있다. 동익에서 나오는 고속의 공기는 반경방향에 대하여 휘어져 있으므로 정익을 설치하여 축방향으로의 유로 변경과 선회하는 유동을 최소화하여 압력을 상승한다. 따라서 정익은 동익 출구의 유동각과 일치하도록 설계되어야 한다. 본 실험에는 수입 제풍과의 비교시험을 위하여 정익을 기존의 것으로 사용하였으므로 설계되어진 동익의 유동각과는 차이를 가지고 있다. 정익에서 충분한 압력의 상승을 얻지 못한 영향으로 실험에서 얻은 결과는 예상한 효율보다는 다소 낮은 압력 상승을 얻게되었다. 효율도 예상효율보다는 5%정도 낮은 효율을 얻게 되었다. 전압력 선도로부터 유량이 85m<sup>3</sup>/min 위치에서 압력이 감소하였다가 다시 증가하는 실속이 발생하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 5는 자유와류법에 의하여 제작된 송풍기의 최대 효율점을 파악하기 위하여 동익의 스테거각을 변화시키면서 성능시험을 수행한 결과이다. Fig. 5에서의 각도는 설계시 선정된 스테거각을 영으로 하는 상대적인 스테거 각도를 나타낸다. 동익의 전단부분을 송풍기의 회전방향으로 변화시키면 양의 각도로 변위를 가한 것이고 음의 각도는 동익의 뒷전을 회전방향으로 변위를 준 것이다. 따라서 음의 변위각이 증가하게 되면 동익의 캠버선은 축방향에 가까워지게 되므로 유량의 증가와 소요동력의 증대를 초래하게 된다. 동익의 스테거 각도를 변화시켰을 때 최대효율점의 변화는 양의 각도에서 점차적으로

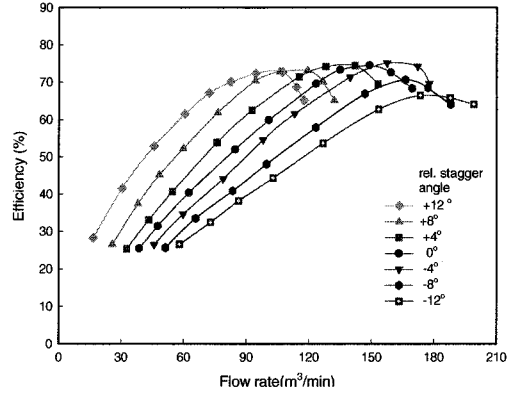


Fig. 5 Efficiency curves according to different stagger angles on a fan designed by the free vortex method

증가하여 -4°의 변화를 주었을 때 최대의 효율점을 얻게 되고 최대효율점을 지나서는 효율이 급격히 감소하는 경향을 나타낸다. 양의 각도로 변화를 주게되면 유량이 저하하고 축방향 속도의 감소로 인하여 받음각이 감소하게 되므로 점차적으로 효율의 감소를 초래하게 된다. 반면에 음의 각도로 변화를 주게되면 축방향 속도의 증가와 익형의 스테거각이 감소한다. 따라서 익형의 코드길이 방향이 축방향에 근접하게 되므로 스테거 각도의 감소에 따라 점차적으로 받음각이 증가하게 되고 익형의 부하계수가 증가한다. 그러므로 압력의 상승을 초래하나 -10° 이상의 값으로 넘어가게 되면 유동의 실속이 발생되어 급격한 효율의 감소를 초래하게 된다. 스테거 각도의 변화에 따른 효율 선도로부터 설계점에서 사용된 받음각에서의 부하계수보다는 큰 값을 사용하는 것이 보다 효율을 높일 수 있는 설계가 될 수 있음을 알 수 있다.

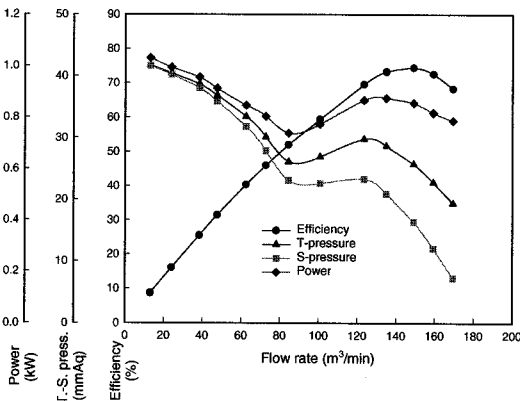


Fig. 4 Performance curve of a fan designed by the free vortex method

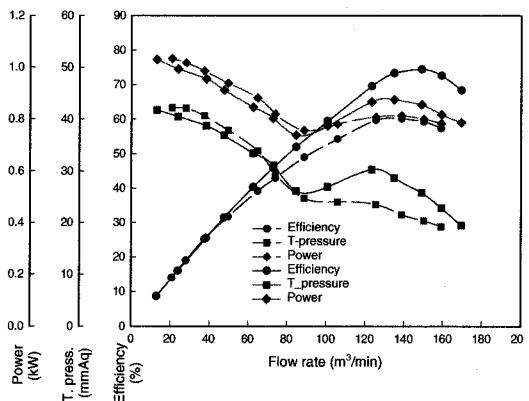


Fig. 6 Performance curve of a fan designed by the free vortex method with (solid line) / without (dash line) bellmouth

입구에 벨마우스를 설치한 경우와 설치하지 않은 경우와의 차이를 Fig. 6에서 보여주고 있다. 입구부에 벨마우스의 설치에 의한 면적의 증가는 흡입 압력이 낮은 경우에는 영향을 미치지 못하지만 흡입 압력이 크게 되면 유속의 증가에 의하여 흡입구 주위의 공기가 흡입되므로 유량의 증가에 큰 영향을 미치게 된다. 또한 이러한 유동은 흡입구의 케이싱 영역에서 벨마우스의 설치에 의하여 유동의 박리 현상을 억제하게 되므로 유동 손실을 저하시키게 된다. 따라서 유량의 증가와 효율의 증가를 얻게 되며 출구 압력의 증대도 얻게된다. 따라서 최대효율점의 위치도 벨마우스의 설치로 인하여 10m<sup>3</sup>/min 정도 상승하게 되었다

Fig. 7은 자유와류법에 의하여 설계되어진 송풍기의 스테저 각도를 변경하면서 식(17)에서 나타내는 비소음도의 값을 나타내고 있다.

$$L_{sa} = L_a - 10 \log(Q \cdot P^2) + 20(dBA) \quad (17)$$

식 (17)에서의 La는 A filter에 의하여 측정된 값이며 유량(Q)는 m<sup>3</sup>/min의 단위로 계산되며 정압상승(P)는 Pascal의 단위로 계산되었다. 비소음도의 최소값은 최대효율점의 위치와 일치하는 특성을 나타내며 최대효율점을 벗어나면서 비소음도는 증가하게 된다. 부하의 증가에 따라 즉 공기유량이 감소됨에 따라서 비소음도의 최대점이 발생되어지는데 이 위치는 실속이 발생되어지는 위치와 일치하고 있으며 실속을 영역을 벗어나면서 비소음도는 다소 감소하였다가 부하가 계속 증가하게 되면 비소음도의 값도 증가함을 알 수 있다. 스테저 각도의 증가에 따른 적은 부하에서 작동되는 경우에는

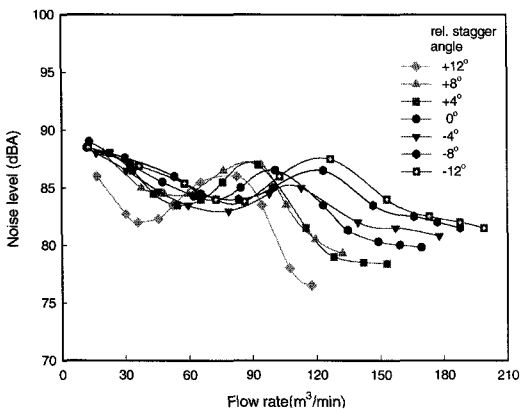


Fig. 7 Specific noise levels for different stagger angles for a fan designed by the free vortex method

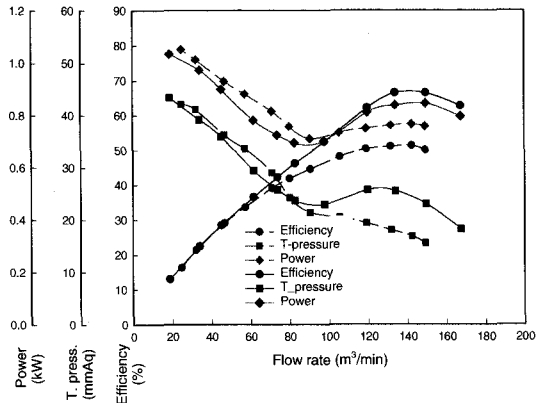


Fig. 8 Performance curve of a fan designed by the forced vortex method with(solid line)/without(dash line) bellmouth

비소음도의 변화가 급격히 변화하는 특성을 나타내는 것은 실속의 범위가 적기 때문이다.

Fig. 8은 강제와류법에 의하여 설계되어진 송풍기의 성능선도의 결과이다. 본 실험에서도 자유와류법에 의하여 제작된 송풍기를 실험하는 방법과 같은 방법으로 정익은 기존의 제품에서 사용되는 것을 사용하였다. 성능의 결과는 유량이 150 m<sup>3</sup>/min에서 전압력이 250 Pa 정도를 나타내고 있으므로 설계 예상치인 306 Pa 보다 다소 낮다. 이러한 것은 정익에서 유로가 일치하지 않음으로 손실이 발생하였기 때문이다. 자유와류법에 의하여

제작된 송풍기의 경우는 150 m<sup>3</sup>/min에서 260 Pa의 전압력 상승을 얻었지만 강제와류법에 의하여 설계된 송풍기에서 얻은 값보다는 높다. 이러한 현상은 강제와류법의 설계에서 적용한 강제와류의 값은 반경방향으로 유량계수를 직선적으로 분포시키면서 팁에서의 부하계수가 자유와류법에 비하여 크도록 설계되었다. 그러므로 팁에서의 손실 영향이 크게되고 적용한 강제와류가 물리적으로 맞지 않으면 내부 손실이 발생되어지기 때문이다. 하지만 적절한 강제와류는 허브에서의 부하를 감소시키게 되고 익형의 비틀림을 줄이게 되어 구조적인 안정성과 역회전시 효율이 증대하게 되는 유리한 점이 있다.

Fig. 9는 강제와류법에 의하여 설계되어진 송풍기의 스테저 각도를 변경하면서 측정된 효율선도의 결과를 나타낸다. 최대 효율점의 선도는 상당히 평평한 곡선을 나타내며 최대효율점은 -4°로 변위를 주었을 때 얻었다. 자유와류법에 의하여 제작된 송풍기의 경우는 음의 각도로 변위를 주었을 때 -10° 이상이 되면 급격히

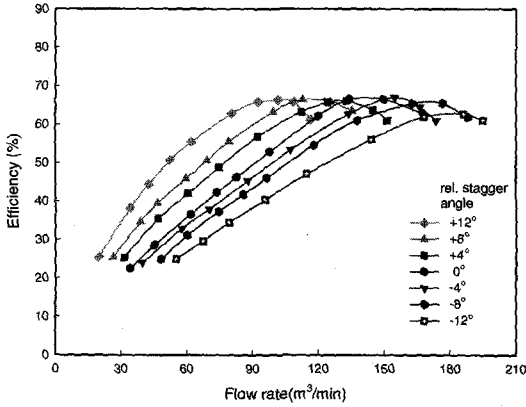


Fig. 9 Efficiency curve for different stagger angles for a fan designed by the forced vortex method

효율이 저하되는 것과는 달리 강제와류법에 의하여 설계된 송풍기의 효율은 완만히 떨어지고 있다. 이러한 이유는 강제와류에 의하여 허브근처의 익형에 부하를 감소시켰기 때문에 음의 각도로 변위를 주어도 공기유동의 실속을 발생하는 받음각까지는 여유가 있기 때문이다. 따라서 강제와류법에 의하여 설계한 송풍기의 경우는 가변형으로 사용하는데 유용한 점이 있다.

벨마우스를 설치하여 실험한 결과에서는 같은 운전 조건에서 최대 효율점의 위치가 벨마우스를 설치하지 않았을 때보다 5 m<sup>3</sup>/min 정도 높은 유량값에서 발생되었다. 유량이 적은 경우에는 효율의 차이가 나타나지 않았으나 유량이 증대하면서 벨마우스의 효과가 크게 나타나며 벨마우스를 설치하지 않았을 때 140 m<sup>3</sup>/min의 유량에서 100 Pa의 전압저하가 있었다. 이러한 것은 흡입구의 케이싱에서 유동 박리의 발생으로 토출압력의 저하를 초래한 것이다. 소음의 경우도 자유와류법에 의하여 설계되어진 송풍기의 경우와 마찬가지로 피크소음은 실속이 발생되어지는 영역에서 발생되었으며 완만한 곡선을 이루며 감소하였으나 양으로 변위를 많이 주게 되면 실속영역이 적어지므로 소음의 레벨은 급격히 감소함을 알 수 있었다.

Fig. 10은 독일의 W사의 제품(DS50A)과 설계된 제품과의 비교를 수행하였다. 실험의 조건은 DS50A의 최적조건인 120 m<sup>3</sup>/min의 유량조건으로 일치시키기 위하여 설계된 제품도 유동각을 변경하여 120 m<sup>3</sup>/min의 유량조건으로 맞추었다. 따라서 설계되어진 제품의 경우는 최대효율점보다는 다소 낮은 효율에서 작동되는 결과가 되며 실험에 사용된 정익도 DS50A의 것을 사용하였으므로 완전한 비교는 아니나 설계된 제품의 간접

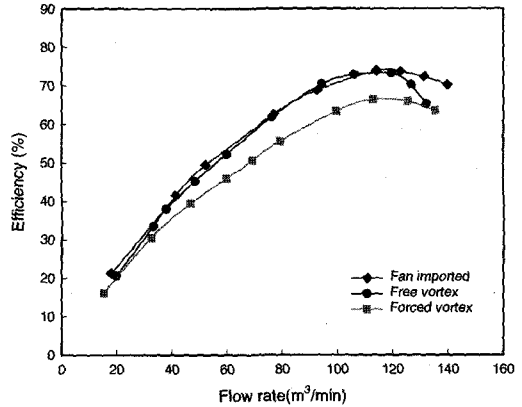


Fig. 10 Comparison of the performance of an imported fan and fans designed by the free/forced vortex method at the flow rate of 120m<sup>3</sup>/min

적인 평가는 된다. 자유와류법에 의하여 설계된 송풍기의 효율과 DS50A의 효율과는 차이가 없으나 최대효율점을 지나 유량이 증가하게 되면 자유와류법에 의하여 설계된 송풍기의 경우는 급격히 효율이 떨어지고 있다. 이는 자유와류법의 경우에 허브측에 큰 부하가 가해져 있으므로 회전수의 증가에 따라 쉽게 유동의 실속이 발생되어짐으로 생기는 현상이다. DS50A의 경우는 이러한 점을 피하기 위하여 강제와류법과 같이 허브측의 부하를 줄여주는 설계를 하였다. 그러므로 DS50A의 효율선도는 강제와류법에 의하여 설계된 송풍기의 효율 선도와 같은 경향을 보이고 있다. 강제와류법에 의하여 설계되어진 송풍기의 효율이 비록 낮은 경향을 보이고 있지만 물리적으로 적절한 와류를 선정하게 되면 효율의 향상과 큰 유량에서도 완만하게 효율이 감소하도록 설계할 수 있음을 알 수 있다.

설계되어진 송풍기의 설계점이 150 m<sup>3</sup>/min 이므로 DS50A도 최대효율의 위치를 150 m<sup>3</sup>/min이 되도록 익형의 각도를 변경하여 실험한 결과를 Fig. 11에서 보여주고 있다. 앞서의 120 m<sup>3</sup>/min로 유량을 맞추어 실험한 결과에서처럼 설계되어진 송풍기의 설계점으로 맞추어 실험하게 되면 설계점에서 작동되는 송풍기의 효율이 스테거 각도의 변화에서 측정되어진 송풍기의 효율보다는 좋은 결과를 얻을 수 있다. 정익에서의 효과가 설계된 송풍기의 경우에는 충분하지 않음에도 불구하고 자유와류법에 의하여 설계된 송풍기의 효율은 DS50A보다 나은 결과를 보여주며 설계점 이상으로 유량을 증가하여도 효율의 감소는 급격하게 변하지 않음을 알 수 있다. 강제와류법에 의하여 설계되어진 송풍



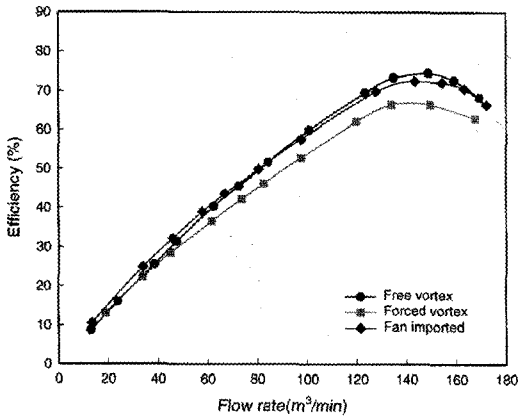


Fig. 11 Comparison of the performance of an imported fan and fans designed by the free/forced vortex method at the flow rate of 150 m<sup>3</sup>/min

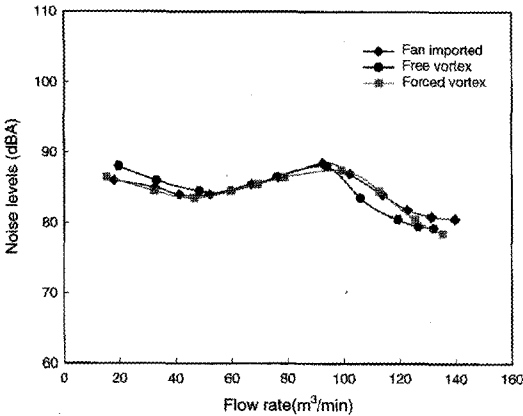


Fig. 12 Comparison of the noise level of an imported fan and fans designed by the free/forced vortex method

기의 경우에는 DS50A보다는 비록 낮은 결과를 보여주고 있으나 효율선도의 변화는 DS50A와 동일함을 알 수 있다. 적절한 강제와류의 선정으로 효율의 상승을 할 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 12는 앞서의 비교 실험과 마찬가지로 DS50A의 최적조건에서 소음을 측정하였다. 피크소음은 실속이 발생되어지는 영역에서 같은 값을 보이고 있으나 유량이 증가하게 되면 자유와류법에 의하여 설계된 송풍기의 소음이 낮은 값을 보여주고 있다. 이는 자유와류법에 의하여 설계된 송풍기의 스테거 각도를 변경하면서 측정된 결과에서 저 유량인 경우에 소음의 레벨이 급격히 감소하는 현상과 일치하는 것으로 오히려 DS50A보다 낮은 소음도를 보여준다.

## 5. 결론

축류송풍기의 설계기술 개발과 자유와류법에 의하여 설계되어진 송풍기와 강제와류법에 의하여 설계되어진 송풍기의 성능시험이 이루어졌으며 참고로 수입된 송풍기와와의 성능비교도 이루어졌다. 자유와류법에 의하여 설계되어진 송풍기가 강제와류법에 의하여 설계되어진 송풍기에 비하여 높은 효율의 결과를 보여주었다. 하지만 선택한 강제와류의 분포에 따라 효율의 결과도 상당히 달라진다. 스테거 각도의 변경에 따라 측정된 성능의 결과에서는 설계된 송풍기의 효율을 상승할 수 있는 설계변수의 값을 제시하였는데 설계시 적용한 익형으로부터 예상한 부하를 얻기 위하여서는 받음각을 4° 정도 크게 하는 것이 유리하다는 것을 보여주었다. 수입송풍기의 경우는 강제와류방식에 의하여 설계되어졌다는 것을 알 수 있었으며 자유와류법에 의하여 설계되어진 송풍기의 효율이 영역에 따라서는 보다 나은 결과를 보여주었으며 소음의 경우도 자유와류법에 의하여 설계되어진 송풍기의 경우가 좋은 결과를 보여주었다.

강제와류법에 의하여 설계하는 경우에는 익형의 허브측에 부하를 조절할 수 있으므로 유량이 증대하여도 효율의 감소가 급격히 발생하지 않는 유리한 점이 있다. 따라서 역회전에 의한 흡배기용으로 사용하게 될 경우에 자유와류법에 비하여 높은 효율을 얻을 수가 있으므로 적용성이 높다. 하지만 적용하는 최적의 강제와류의 세기는 여러 실험을 통하여 알 수 있으므로 차후 강제와류의 최적화를 위한 연구가 필요하다. 뿐만 아니라 정익에서의 압력상승을 위하여 동익의 유로와 일치하는 정익을 장착하여 실험을 수행할 필요가 있다.

## 참고문헌

- (1) 유체기계 연구개발 협의회, 1996, "유체기계연구개발협의회 창립총회 및 초청강연회", 유체기계연구개발 협의회집
- (2) Eck, B., 1973, Fans : Design and Operation of Centrifugal, Axial-Flow and Cross-Flow Fans, Translated and Edited by Azad, R. S., Scott, D. R., Pergamon Press.
- (3) Miller, D. S., 1971, A Guide to Losses in Pipe and Duct Systems, British Hydro-mechanics Research Associations.

- (4) Horlock, J. H., 1973, Axial Flow Compressor, Robert E. Krieger Publish Co.
- (5) Wallis, R. A., 1961, Axial Flow Fans, Academic Press.
- (6) Wallis, R. A., 1983, Axial Flow Fans and Ducts, John Wiley & Sons.
- (7) 한국표준협회, 1982, 송풍기의 시험 및 검사방법.
- (8) 한국표준협회, 1987 송풍기, 압축기의 소음 레벨 측정방법.
- (9) 조수용, 오종학, 윤의수, 1998, “축류송풍기 설계시 적용된 와류형식의 효과에 관한 연구,” 대한기계학회 춘계학술대회논문집, pp. 655~660.
- (10) 최범석, 1999, 축류 송풍기 설계기술 국산화 개발, 한국기계연구원 보고서.