

## 축류 송풍기의 공력학적 설계

손상범\* · 주원구\*\* · 조강래\*\* · 남형백\*\*\* · 윤인규\*\*\* · 남임우\*\*\*

### Aerodynamic Design of the Axial Fan

Sang-Bum Sohn\*, Won-Gu Joo\*\*, Kang-Rae Cho\*\*,  
Hyung-Baik Nam\*\*\*, In-Kyu Yoon\*\*\*, Leem-Woo Nam\*\*\*

Key Words: Axial Fan(축류 송풍기), Aerodynamic Design(공력학적 설계), Cascade Theory(익렬 이론)

#### ABSTRACT

In this study, a preliminary design method of the axial fan was systematically established based on the two-dimensional cascade theory. Flow deviation, lift coefficient, distribution of velocity and pressure coefficient on blade surfaces were predicted by an inviscid flow theory of Martensen method, which was also applied to select an airfoil for required performance in the present design process. The aerodynamic performance of designed blades can be predicted quickly and reasonably by using the through-flow calculation method in the preliminary design process. It would be recommendable to adopt three-dimensional viscous flow calculation at the final design refinement stage.

#### 1. 서론

축류 터보기계 설계 기법은 주로 항공기 터보제트 엔진 또는 산업용 가스터빈 등에 사용되는 고압 압축기 날개를 설계하기 위하여 발달되었다. 그러나 축류 터보기계의 기본 설계 방법은 저압용 송풍기에서 고압용 압축기까지 적용될 수 있다. 이 논문에서는 고압용 축류 터보기계 설계 기법을 저압용 송풍기에 적용하여 설계하는 방법을 제시하고, 실제로 대상 송풍기를 설계하여 개발된 설계 방법을 검증하고자 한다.

축류 송풍기의 초기 설계 단계에서는 이차원 익렬 이론을 기본으로 다양한 실험치와의 상관 관계를 이용하여 로터와 스테이터를 설계하고, 허브 형상을 결정

한다. 로터와 스테이터의 설계에는 날개에 의한 유동의 전향과 양력 계수를 예측하는 비점성 방법인 Martensen 방법<sup>(1)</sup>을 도입한다. 초기 설계된 송풍기에 통과유동 계산방법(through-flow calculation)<sup>(2)</sup>, 또는 삼차원 난류 점성 수치해석<sup>(3)</sup>을 각각 적용하여 성능과 유동상태를 확인하고 보완할 수 있게 한다. 예측된 성능이 설계 사양과 차이가 생겼을 경우에는 여러 가지 설계인자를 변화시키며 초기 설계와 성능예측 과정을 반복 수행하여 최적화된 송풍기를 설계한다. Fig. 1은 초기 설계와 성능 예측에 대한 개략적인 순서도이다.

설계대상 축류 송풍기는 일반적으로 많이 사용하는 1단 축류 송풍기(axial fan)로서, Fig. 2와 같이 송풍기 내부로 유동을 안내하는 송풍기의 입구부분과 유체에 에너지를 전달하는 로터 부분, 회전 방향의 속도 성분을 정압으로 바꾸어 주는 스테이터 부분 그리고, 사용 목적에 맞도록 유동을 유출시키는 송풍기 출구 부분으로 나누어진다.

\* 연세대학교 대학원

\*\* 연세대학교 기계·전자 공학부

\*\*\* (주) 센추리

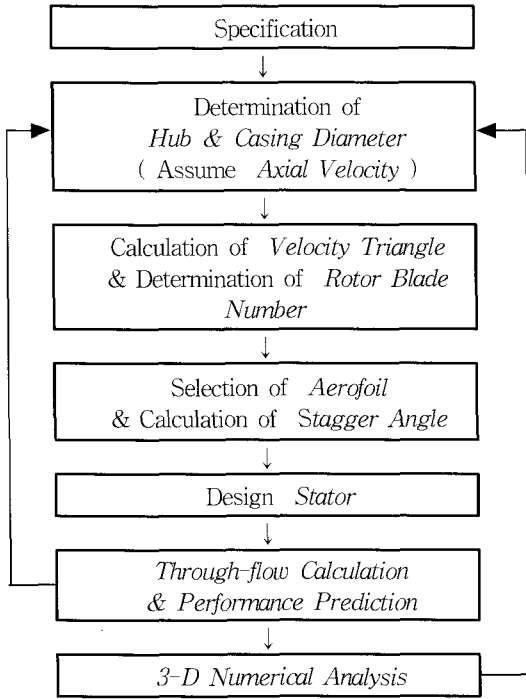


Fig. 1 Axial fan design process

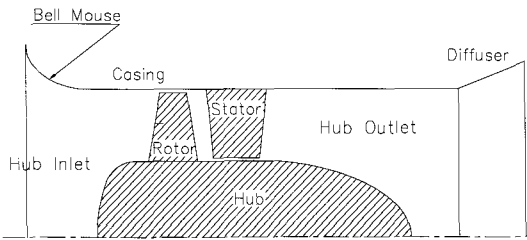


Fig. 2 Configuration of axial fan

## 2. 설계 과정

### 2.1. 설계 사양

축류 송풍기의 설계 사양은 사용 용도에 따라 다르지만, 기본적으로 유량, 회전속도, 전압 상승량이 주어진다. 이 중 유량과 전압 상승량은 축류 송풍기의 설계에 반드시 필요한 설계 조건이고, 회전속도는 설계 사양으로 주어지기도 하며 진동기의 용량에 맞추어 결정되어지기도 한다. 전압 상승량은 축류 송풍기 입구와 출구 사이의 전압 상승량을 의미하며 설계시에는 스테이터와 허브 등의 손실을 고려하여 이에 준하는

전압을 더하여 로터 설계에 필요한 설계 사양으로 주어져야 한다. 이를 이룬 전압 상승량이라 하고, 축류 송풍기의 전압 효율( $\eta$ )을 이용하여 다음과 같이 표현된다.

$$H_{th} = H/\eta \quad \text{또는,} \quad \Delta P_t = \rho g H_{th} \quad (1)$$

### 2.2. 내경 및 외경의 결정

설계 사양이 주어지면 먼저 내경 및 외경을 결정하여야 한다. 내경은 일반적으로 진동기의 크기와 같은 크기를 가지도록 설계되지만, 아래 식에서 주어지는 값보다는 항상 커야 한다.

$$r_h > \frac{30}{n\pi} \sqrt{gH_{th}} \quad (2)$$

이는 허브에서의 속도 삼각형이 물리적인 의미를 갖기 위한 조건으로, 만약 위식에서 주어지는 것보다 작은 경우에는 허브에서 실속(stall)이 발생할 수 있다. 내경이 결정되면 주어진 유량에서 최대 효율이 되는 최적 유량계수를 찾은 후 아래의 식으로부터 이 유량계수를 갖도록 외경을 결정한다.

$$\phi_{opt} = \frac{V_x}{r_{tip} \Omega} \quad (3)$$

일반적으로 같은 유량에서 송풍기 전체의 손실을 최소화하는 최적의 유량계수가 존재하게 되는데, 로터와 스테이터의 손실은 손실모델을 사용하고 송풍기 입구와 출구에서의 손실은 점성 난류 수치계산을 행하여 구할 수 있다.<sup>(4)</sup>

### 2.3. 로터 설계

#### 2.3.1. 속도 삼각형 결정<sup>(5,6)</sup>

로터 및 스테이터 익렬에 대한 속도 삼각형은 Fig. 3과 같다. 축 방향으로 들어온 유동은 오일러 방정식(Euler equation)에 의해 로터로부터  $U(C_{t2} - C_{t1})$ 만큼의 일을 받고  $C_{t2}$ 의 회전방향 속도성분으로 유출된다. 이 유동은 스테이터에 의해 다시 축방향으로 바뀌면서 정압이 상승된다. 이와 같은 속도삼각형은 반경이 커짐에 따라 익렬의 원주 방향 속도  $U$ 가 커지므로 Fig.

4 와 같이 유동각은 날개의 팁(tip)부분과 허브(hub)부분에서 큰 차이가 생긴다. 따라서 반경 방향으로 영각의 증대를 막기 위해 날개는 반경에 따라 설치각을 변화시켜 주어야 하므로 날개는 비틀린 형태를 취하게 된다.

로터 후방에서의 원주방향 속도의 ( $C_{\theta 2}$ )의 크기는 먼저 평균 반경에서 결정한다. 평균 반경에서의 원주방향 속도는 설계 사양에서 주어지는 전압 상승량과 오일러 방정식을 이용하여 아래의 식으로부터 구해진다.

$$gH_{TH} = U(C_{\theta 2} - C_{\theta 1}) \quad (4)$$

이 때 입구 안내익이 없는 경우에는 대부분 로터전방에서의 원주방향 속도는 0이다.

평균 반경에서 원주방향 속도가 결정되면 와류 설계법(vortex design)을 이용하여 평균 반경 이외의 반경에서의 원주방향 속도성분을 계산한다. 와류 설계법에는 자유 와류강도 설계법 등 여러 가지가 있으나 현재의 설계에서는 혼합 와류 설계법을 사용하였다.

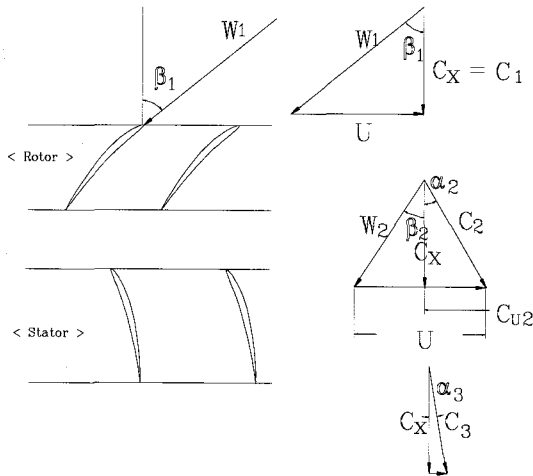


Fig. 3 Velocity triangles

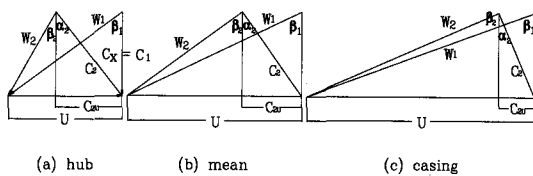


Fig. 4 Velocity triangles at each radial position

이 와류 설계법은 아래와 같이 출구에서의 원주방향 속도를 자유 와류와 강제 와류의 혼합된 형태로 표현한다.

$$C_{\theta 2} = A \cdot r + \frac{B}{r} \quad (A, B \text{ 는 상수}) \quad (5)$$

이 와류식을 이용하여 설계하면 허브에서의 부하를 조절할 수 있기 때문에 사용한다. 식 (5)에서 상수 A, B, 는 평균 반경에서 계산된 원주방향 속도와 다음 절에서 설명되는 허브에서 주어지는 최대 확산 계수 ( $DF$ :diffusion factor)를 이용하여 구한다.

### 2.3.2. 날개수 결정(7,8)

날개의 개수를 결정하는데 있어서는 송풍기 설계시 중요한 파라미터인 확산계수를 이용한다. 확산계수는 Lieblein(1958)에 의해 제안된 파라미터로서 형상손실을 계산할 수 있는 운동량 두께의 크기와 관련이 있다. Fig. 5에서 익형의 종류에 무관하게 운동량 두께와 확산계수 사이에 상관관계가 있음을 볼 수 있다. 확산계수가 0.6이상일 때 유동 박리에 의해 운동량 두께 즉, 손실이 급격히 증가하기 때문에 일반적으로 설계시에는 여유를 두어 확산계수가 0.45정도로 되도록 한다.

Lieblein이 제시한 확산계수는 다음과 같이 정의된다.

$$DF = \left[ 1 - \frac{\cos \beta_1}{\cos \beta_2} \right] + \frac{(\tan \beta_1 - \tan \beta_2) \cos \beta_1}{2\sigma} \quad (6)$$

확산계수가 주어지면 이 식으로부터 현질비( $\sigma = \text{익현장/피치}$ )를 계산할 수 있다. 여기서 익현길이( $c$ : chord length)는 아래와 같이 가정된 종횡비( $AR$ : aspect ratio)로부터 구해진다.

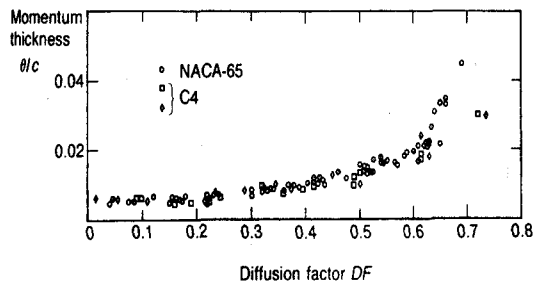


Fig. 5 Wake momentum thickness versus overall diffusion factorfor NACA65 and C4 aerofoil

$$AR = (r_t - r_h) / c = 1.0 \sim 2.5 \quad (7)$$

그러므로 날개수( $Z$ )는 기하학적 관계식인 아래 식에서 계산된다.

$$Z = (2\pi r\sigma) / c \quad (8)$$

날개수가 결정되면 앞에서 설명한 와류 설계법으로 각 반경위치에서의 속도삼각형을 결정하고, 각 부분의 확산계수를 확인하여야 한다. 만약 확산계수의 값이 0.45보다 상당히 커지는 부분이 있다면 날개의 개수를 하나씩 늘려가며 그 때마다 확산계수를 확인해 보아야 한다.

평균 반경에서의 확산계수를 작게 설정할수록 날개수는 늘어난다. 하지만, 날개 수가 늘어남에 따라 저유량에서의 실속 여유폭(stall margin)이 매우 커져서 실속에 대한 가능성이 적어지므로 넓은 유량 범위에서 작동하는 축류 송풍기를 설계 할 경우에는 작은 확산계수로 설계하는 것이 바람직하다. 하지만, 사용 유량범위가 좁은 경우에는 제작비를 감안하여 적당한 개수의 날개가 설계되도록 0.45 정도에서 확산 계수를 설정한다.

### 2.3.3. 익형 설정<sup>(9)</sup> 및 설치각 결정

날개의 형상은 속도삼각형 결정법으로부터 계산된 속도삼각형의 전향각에 맞추어 새롭게 설계할 수도 있고 성능이 입증된 기존의 날개 형상을 선택하여 설계할 수도 있다. 설치각은 Martensen방법을 이용하여 설치각을 반복 계산하여 결정할 수가 있다. 이 Martensen 방법은 이차원 날개 형상을 와류의 분포로 바꾸고 이로부터 날개 주위의 속도분포나 압력분포 그리고 날개에 의한 유동의 전향각을 예측하는 비점성 이론으로, 비교적 정확한 유동의 전향과 양력계수값을 제시해 준다.

### 2.4. 스테이터 설계<sup>(8)</sup>

스테이터의 개수는 보통 회전자와의 간섭을 줄이기 위해서 로터의 수보다 하나가 많거나 적도록 한다. 스테이터에 대한 유동의 유입각은 로터의 절대 유출각과 같고, 평균 반경에서의 스테이터의 속도삼각형은 스테이터의 유출각을  $0^\circ$  이 되도록 선정한다. 유입각과 유출각이 정해지면, 이에 맞는 스테이터를 설계할 수 있게 된다. 본 설계 방법에서는 C1 날개의 10% 두께를 가진 NGTE의형으로 설계하는데, 이 익형은 캠버라인으로 원호익을 사용하고 Lieblein chart를 이용하여 형상을

설계 할 수 있다. 초기 가정된 캠버각( $\theta_c$ )과 Lieblein chart로 부터 계산된 최소손실 입사각( $i^*$ ), 편차각( $\delta^*$ ) 그리고, 유동각( $\alpha_2$ )으로 부터 유출각( $\alpha_3$ )은 다음 식으로 계산된다.

$$\alpha_3 = \alpha_2 - \theta_c - i^* + \delta^* \quad (9)$$

스테이터의 유출각이  $0^\circ$ 에 가깝게 되도록 즉, 유동이 축방향으로 흐르도록 캠버각을 반복 계산하여 구한 후 다음 식으로 설치각( $\zeta$ )을 구함으로써 스테이터의 설계가 끝나게 된다.

$$\zeta = \alpha_1 - i^* - \frac{\theta_c}{2} \quad (10)$$

그러나, 일반적으로 산업용 축류 송풍기의 스테이터는 제작비용을 고려하여 NGTE 날개를 사용하지 않고 두께가 얇고 일정한 원호 캠버날개를 사용할 수도 있다.

### 2.5. 허브의 형상설계

축류 송풍기에 있어서 허브의 형상과 치수는 손실과 크게 관련되어 있기 때문에 송풍기 성능에 중대한 영향을 미친다. 설계에 있어서는 익렬 전방에서의 축방향 속도분포가 반경방향으로 균일하게 되도록 허브 형상을 선정하고, 허브 저항에 의한 손실이 가급적 작게 되도록 한다.

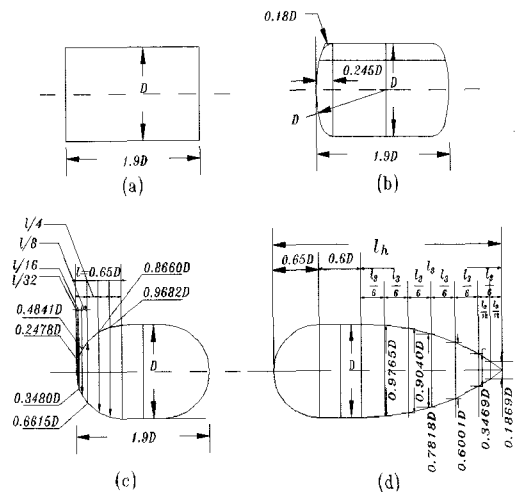


Fig. 6 Configuration of hub shape

허브의 형상은 일반적으로 아래 Fig. 6의 4가지를 생각할 수 있는데, 원통형의 형상(a)에서 유선형의 형상(d)로 갈수록 허브의 성능이 개선되고 총압 손실량이 줄어든다. 그러나, 실제 축류 송풍기에서 허브의 확산 손실이 작은 (d)의 형상을 사용하는 경우 전동기가 허브 안에 있어야 하고 이럴 경우 전동기의 냉각을 위해 냉각 팬을 설치해야 하므로 이에 따른 동력손실 및 제조 단가가 증가하게 된다. 따라서, 일반적으로 축류 송풍기에서는 (b)의 형상의 허브 후방에 전동기를 설치하고 송풍기내를 흘러가는 유동에 의해 전동기가 냉각될 수 있도록 한다. 이럴 경우, 허브 확산 손실은 증가하지만 냉각 팬을 사용할 필요가 없으므로 더 경제적이다.

### 2.6. 통과유동 계산(through-flow calculation) 방법을 이용한 성능예측

기본설계가 끝나면 제작하기 전에 설계된 송풍기가 요구하는 유량과 압력상승을 만족시키는지 확인하여야 한다. 송풍기에서의 유동은 매우 복잡한 3차원 유동이므로 3차원 난류 점성유동 계산을 통해서만이 비교적 정확하게 성능과 유동장의 구조를 계산할 수 있지만, 3차원 수치계산은 많은 계산 시간과 고성능의 컴퓨터를 요구한다. 따라서, 초기 설계 단계에서는 매우 빠르게 성능을 예측할 수 있는 방법이 필요하며 손실을 고려하는 비점성 2차원 유동계산 방법인 통과유동 계산방법이 주로 사용된다.

본 연구에서는 회전방향으로의 변화가 없는 축대칭( $\partial/\partial\theta$ )면으로 가정한 자오면에서 유동의 물리적 의미를 강조하고 어느 형상에서나 적용 가능한 Denton(1978)의 유선곡률법(streamline curvature method)<sup>(2)</sup>을 이용하였다. 또한 여러 가지 손실모델을 적용하여 성능을 예측하였다.

### 2.7. 완전 3차원 유동계산을 이용한 성능예측

초기설계를 마친 송풍기는 제작하여 성능을 측정하기 이전에 설계가 제대로 되었는지를 좀 더 정확하게 검사하기 위하여 완전 3차원 난류 점성유동 수치계산 방법을 사용하여 성능계산을 수행한다. 만약 예측된 성능이 설계사양과 차이가 생겼을 경우에는 허브비, 유량계수, 종횡비 등의 설계인자를 변화시키며 초기설계와 성능예측 과정을 반복 수행하여 최적화된 송풍기를 설계한다.

## 3. 적용 사례

### 3.1. 설계 사양

Table 1 Specification of Axial Fan

Flow Rate (m <sup>3</sup> )	5.663
Total Pressure Rise (Pa)	510
Rotation Speed (rpm)	1770
Hub Radius (m)	0.178

지금까지의 설계법을 사용하여 Table 1의 설계 사양을 만족하는 축류 송풍기를 설계하였다. Table 1의 전압 상승량은 송풍기 입구와 출구 사이의 값으로서 로터 설계시에는 로터 이외의 손실을 고려하여 다음의 이론수두를 이용하였다.

$$H_{th} = H / (\eta_r \eta_a) = 800 \text{ Pa}$$

여기서,  $\eta_a$ 는 축류 송풍기의 입구와 출구, 스테이터의 손실을 고려하여 70%로 가정하였고,  $\eta_r$ 는 로터의 손실을 고려하여 90%로 가정하였다.

### 3.2. 외경의 결정

설계 시방에는 송풍기의 전동기 크기를 고려하여 내경이 주어져 있다. 따라서 이 과정에서는 외경만을 결정하면 된다. 우선 로터 전방에서의 유동이 회전 방향의 속도없이 축 방향만으로 유입되고 로터 익렬의 효율을 90%로 가정하였을 때, 내경의 제한조건을 만족하고 있었다. 그리고 최적의 유량계수를 찾아내어, 축방향 속도(20.46 m/s)와 외경(0.346 m)을 결정하였다.<sup>(4)</sup>

### 3.3. 로터 설계

먼저 허브에서의 부하를 줄이기 위하여 혼합 와류 설계법을 적용하여 속도삼각형을 결정하였다.

날개의 개수는 평균반경 위치에서의 확산계수를 0.45로 가정하면 6개가 된다. 그러나 이 때 평균반경 이외의 반경에서의 확산계수를 구해 보면 0.45보다 커지는 반경이 나타나게 된다. 각 반경위치에서의 확산 계수가 모두 0.45보다 작게 되기 위해서는 최소한 8개의 날개가 필요하다. 따라서 본 설계 사양에 맞는 송풍기는 로

터의 개수가 8개이면 안정적인 것이라고 예측할 수 있었다. 그러나 본 설계에서는 넓은 유량 범위에서의 안정성을 위하여 날개의 개수를 10개로 고정하였다. 또한 종횡비를 각 반경위치에서 1.3으로 설계하였다.

로터 익형은 축류 송풍기의 성능범위에서 가장 적합한 *NACA24* 익형으로 설계하였다.

설치각은 먼저 주어진 익형에 대해서 비교적 정확한 유동의 전향을 제시해 주는 *Martensen* 방법을 이용하여 반복 계산하여 결정하였다. 여기서 결정된 설치각이 설계결과를 만족하는지 3차원 점성 수치계산을 통하여 최종 확인한다.

### 3.4. 스테이터 설계

스테이터는 축류 송풍기의 제작비용을 고려하여 앞에서 개발한 *NGTE*익을 사용하지 않고 두께가 얇고 일정한 원호 캠버를 사용하여 설계하였다. 스테이터의 개수는 로터와의 간섭을 줄이기 위하여 로터의 개수보다 하나가 많도록 하였으며 익현장은 로터의 1.5배로 가정하여 설계하였다.

### 3.5. 설계 결과 및 성능곡선

Table 2, 3 은 각각 설계된 로터와 스테이터의 형상 치수와 유동변수를 제시하였다.

설계된 축류 송풍기를 제작하여 KS B6311-“송풍기의 시험 및 검사방법”에 따라 Fig. 7과 같이 장치를 구성하여 성능시험을 수행하였다. Fig. 8에는 성능시험과 로터와 스테이터의 정상 간섭효과를 고려한 완전 3차원 수치계산<sup>(10)</sup>에 의하여 얻어진 성능곡선, 그리고 설계사양을 함께 도시하였다. 성능시험의 결과와 수치계산의 결과를 비교하여 보면 정성적으로는 같게 예측하

나 정량적으로는 수치계산이 다소 높게 예측하고 있다. 이는 수치계산이 로터의 전방부터 스테이터의 후방까지만을 대상으로 삼았기 때문에, 스테이터 후방부터 실제 전압을 측정할 위치까지에서 발생하는 전동기 후방의 확대부분, 송출관로 및 연결관 등에 의한 손실을 포함하고 있지 않음으로 인해 발생하는 것이다. 실제로 Fig. 9에서 보듯이 로터 후방에서 예측된 전압이 측정값과 유사함으로부터 수치계산이 어느 정도 정확히 성능을 예측하고 있음을 알 수 있다. 또한 Fig. 8의 성능곡선의 비교로부터 설계된 송풍기가 주어진 설계사양을 만족시키고 있음을 알 수 있다. 따라서 개발된 설계 방법이 타당함을 알 수 있었다.

Table 2 Result of rotor blade design

Blade Number	10				
Chord(m)	0.13				
Radius(m)	0.178	0.227	0.275	0.311	0.346
Blade(NACA)	2409	2408	2408	2407	2407
Stagger(°)	44.7	55.0	61.4	64.9	67.1
Solidity	1.156	0.908	0.748	0.662	0.595
Lift Coefficient	0.632	0.656	0.689	0.727	0.767
DF	0.385	0.371	0.366	0.366	0.369
$C_{u2}$ (m/s)	12.508	12.420	12.877	13.407	14.045
Rel. flow inlet angle(°)	57.133	63.091	67.320	69.685	71.619
Rel. flow outlet angle(°)	43.860	54.222	60.794	64.240	66.953

Table 3 Result of stator blade design

Blade Number	11				
Chord (m)	0.195				
Radius (m)	0.178	0.227	0.275	0.311	0.346
곡률반경 (m)	0.353	0.316	0.277	0.249	0.224
Stagger (°)	10.45	10.45	10.45	10.45	10.45

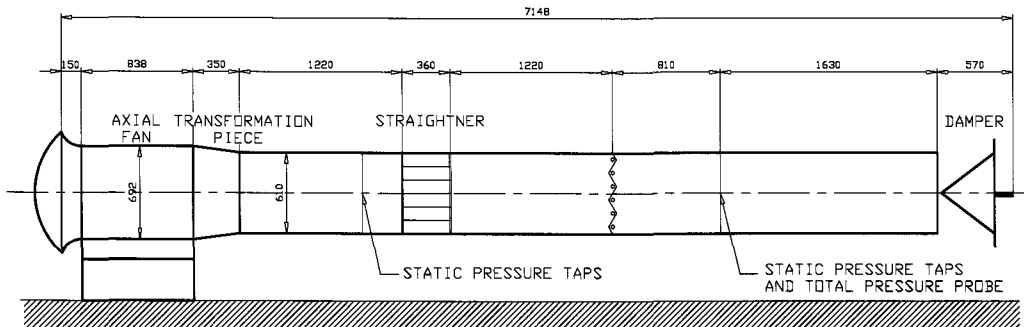


Fig. 7 Overall Schematic Diagram of Experimental Apparatus

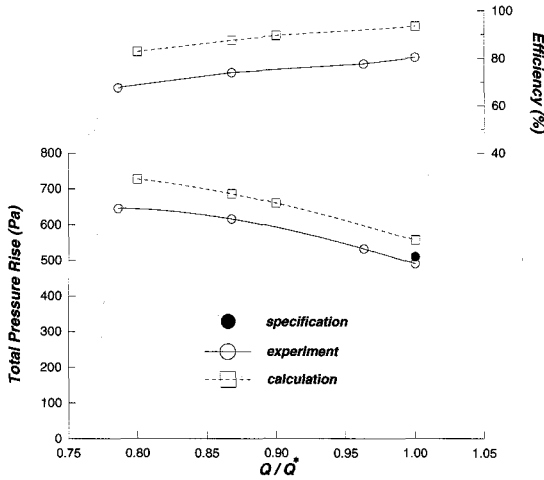


Fig. 8 Performance Curve

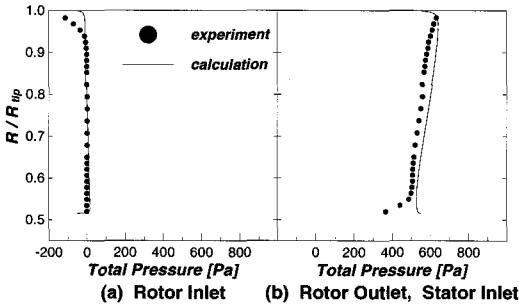


Fig. 9 Total Pressure Distributions

#### 4. 결론

본 연구에서는 이차원 익렬이론을 이용한 축류 송풍기 설계방법을 체계적으로 확립하였다. 최종적으로 개발된 설계방법으로 실제 축류 송풍기를 설계하였고,

이를 제작하여 성능시험을 수행하였다. 측정된 성능을 설계사양과 비교하여 개발된 설계방법의 타당성을 검증하였다.

#### 참고문헌

- (1) Lewis, R. I., 1996, Turbomachinery Performance Analysis, John Wiley & Sons Inc..
- (2) Denton, J. D., 1978, "Throughflow calculations for transonic axial flow turbines," ASME Journal of Engineering for Power, vol 100, pp. 212~218.
- (3) Patankar, S. V., 1980, Numerical heat transfer and fluid flow, Hemisphere, Washington, DC..
- (4) 안광협, 주원구, 조강래, 1998, "축류 송풍기의 유입속도 허브비의 선정", 유체기계공업학회 '98 강연회 및 연구개발 발표회 논문집.
- (5) Dixon, S. L., 1978, Fluid mechanics, Thermodynamics of turbomachinery, 3rd edition, Pergamon Press, London.
- (6) Horlock, J. H., 1973, Axial flow compressors-Fluid mechanics and Thermodynamics, Krieger Publishing Co., Inc. Huntington, New York.
- (7) Wallis, R. Allan, 1993, Axial flow fans and ducts, Krieger Publishing Co., Malabar, Florida.
- (8) Cumsty, N. A., 1989, Compressor Aerodynamics, Longman Scientific & Technical.
- (9) Abbott, Ira H., 1959, Theory of Wing Sections, Dover Publication, Inc..
- (10) 손상범, 주원구, 조강래, 1998, "정상 간섭 익렬 모델을 사용한 1단 축류 송풍기의 성능 예측", 유체기계공업학회 1998 유체기계 연구개발 발표회 논문집.